

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2020

Tomáš Hadašček

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra Elektroenergetiky

Vliv sněhové pokrývky na výkon fotovoltaických elektráren
Impact of snow on photovoltaic powerplant performance

Student: Tomáš Hadašček
Vedoucí [bak./diplomové] práce: Ing. Jan Fulneček, Ph.D.

Ostrava 2019/2020

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student:

Tomáš Hadašček

Studijní program:

B0713A060005 Elektroenergetika

Téma:

Vliv sněhové pokrývky na výkon fotovoltaických elektráren
Impact of snow on photovoltaic powerplant performance

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

V bakalářské práci vypracujete následující body:

1. Potenciál FVE v ČR
2. Popis vyšetřované FVE
3. Odhad množství nevyrobené energie v důsledku přítomnosti sněhové pokrývky

Seznam doporučené odborné literatury:

S. Guo, T. M. Walsh, A. G. Aberle and M. Peters, "Analysing partial shading of PV modules by circuit modelling," 2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Austin, TX, 2012, s. 2957-2960.

Saadsaoud, M. a kolektiv. "Study of Partial shading Effects on Photovoltaic Arrays with Comprehensive Simulator for Global MPPT control." International Journal of Renewable Energy Research, svazek 6, číslo 2, 2016

Teo, J.C. & Tan, Rodney & Mok, V.H. & Ramachandaramurthy, Vigna & Tan, ChiaKwang. (2018). "Impact of Partial Shading on the P-V Characteristics and the Maximum Power of a Photovoltaic String". Energies, číslo 11, 2018.

Volker Quaschnig. Obnovitelné zdroje energií. 1. vyd. Praha: Grada, 2010. 296 s. ISBN: 978-80-247-3250-3


Petr Mastný a kolektiv. Obnovitelné zdroje elektrické energie. 1. vyd. Praha 2011. 256 s. ISBN: 978-80-01-04937-2

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Fulneček, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2019

Datum odevzdání: 30.04.2020


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry

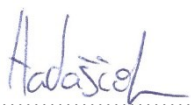



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Čestné prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci, včetně všech příloh, vypracoval samostatně. Uvedl jsem také všechny literární prameny, publikace a internetové stránky, ze kterých jsem čerpal.

Odevzdáno dne 15. května 2020


.....
Tomáš Hadašček

Poděkování

Tímto děkuji panu Ing. Janu Fulnečkovi, Ph.D., jakožto vedoucímu mé bakalářské práce, za všemožné rady a doporučení, které mi pomohly při vypracování této práce. Děkuji také všem ostatním, kteří mně podporovali při realizaci této bakalářské práce.

Abstrakt

Vliv sněhové pokrývky na výkon fotovoltaických elektráren

Tato bakalářská práce rozebírá v teoretické části problematiku solární energetiky v české republice. Zaměří se všeobecnou teorií solární energie, dále na implementaci solárních technologií v ČR a jejím následném využití. Dále se zaměří na meteorologické podmínky ovlivňující výrobu energie ze slunce.

V praktické části bude provedena analýza off-grid systému v areálu Vysoké Školy Báňské. Analýza se bude zaměřovat na chod této elektrárny v zimních měsících a vyhodnocení chodu elektrárny. Cílem hodnocení budou ztráty ve sněhové dny a předpokládaný útlum výroby za 3 zimní měsíce

Klíčová slova

analýza, fotovoltaický, fotovoltaické články, elektrárna, sněhová pokrývka, účinnost, zákryt, ztráty

Abstract

The impact of snow blanket on the performance of photovoltaic power plants

This bachelor's work discusses in the theoretical part the issue of solar energy in the Czech Republic. It will focus on the general theory of solar energy, as well as the implementation of solar technologies in the Czech Republic and its subsequent use. It will also focus on weather conditions affecting the generation of energy from the sun.

The practical part will be to analyse the off-grid system on the campus of the Technical University of Ostrava. The analysis will focus on running this plant in the winter months and evaluating the operation of the plant. The evaluation will target losses on snow days and a projected contraction in production over the 3 winter months

Keywords

analysis, photovoltaic, PV cells, power plant, snow cover, efficiency, cover, losses

Obsah

Seznam Ilustrací	6
Úvod.....	8
1 Základy Fotovoltaiky	9
1.1 Světlo.....	9
1.1.1 Optimalizace umístění.....	12
1.2 Fotoelektrický jev	13
1.3 Využití ve fotovoltaice	13
2 Základy Fotovoltaiky	14
2.1 Fotovoltaický článek	14
2.2 Limitace.....	16
2.3 Vliv Sněhové pokrývky a námrazy	17
2.4 Technické rozdělení FV článků.....	18
2.4.1 Konstrukce	18
2.4.2 Použitý materiál	20
3 Potenciál Fotovoltaických elektráren v ČR.....	21
3.1 Dostupná energie	22
3.2 Podíl spotřebované energie z FVE	25
4 Popis a energetická bilance vyšetřované fotovoltaické elektrárny	26
4.1 Schéma a popis vyšetřované FVE	28
4.2 Energetická bilance	28
5 Odhad ztrát energie na fotovoltaické elektrárně	30
5.1 Ztráty před polednem	34
5.2 Ztráty po poledni	35
5.3 Korekce ztrát	36
5.4 Celkové ztráty.....	37
5.5 Aplikace.....	39
Závěr	40
Seznam zkratek	43

Seznam Ilustrací

Obrázek 1 ... Poměr závislosti přímého a difuzního záření na ročním období [1,7].....	10
Obrázek 2 ... Diagram optimálního postavení FV panelů vůči slunci [2].....	12
Obrázek 3 ... Přechod elektronu z valenčního pásma do vodivostního po osvětlení [10]	13
Obrázek 4 ... Průřez konstrukcí FV článku [2]	15
Obrázek 5 ... Skládání Fv článků do větších celků [11].....	15
Obrázek 6 ... Využitelné spektrum slunečního záření pro Si FV panel [10].....	16
Obrázek 7 ... Roční průměrný úhrn dopadajícího světelného záření na území ČR [7,8]	22
Obrázek 8 ... Průměrný roční výnos FVE o výkonu 1kWp v ČR [14]	23
Obrázek 9 ... Délka slunečního svitu na území ČR[3]	23
Obrázek 10 ... Koncentrace znečištění částicemi PM _{2,5} z roku 2018 [5]	24
Obrázek 11... Koncentrace znečištění částicemi PM ₁₀ z roku 2018 [5].....	24
Obrázek 12 ... Realizace souboru FVE P3 a VE P1	26
Obrázek 13 ... Realizace souboru FVE P4 a VE P2.....	27
Obrázek 14 ... Schéma vyšetřovaného off-grid systému.....	28
Obrázek 15 Graf průměrného denního energetického zisk z vyšetřované FVE části off-grid systému za zimní měsíce	31
Obrázek 16 ... Graf srovnání hodnot průměrných výrob FVE za zimní měsíce a měřeného dne, kdy padal sníh.	32
Obrázek 17 ... Podrobné porovnání výroby FVE P3 ve sledovaný den proti průměrné výrobě v zimě.....	32
Obrázek 18 ... Podrobné porovnání výroby FVE P4 ve sledovaný den proti průměrné výrobě v zimě.....	33

Seznam Tabulek

Tabulka 1 ... Celková energetická bilance ČR za rok 2018 [16]	25
Tabulka 2 ... Podíl krajů na celkové výrobě energie z FVE za rok 2018 [16]	25
Tabulka 3 ... Technický potenciál FVE v ČR [12].....	25
Tabulka 4 ... Bilance provozu elektrárny za 3 zimní měsíce	29
Tabulka 5 ... Hodnoty z dopoledního měření.....	34
Tabulka 6 ... Dopolední ztráty.....	34
Tabulka 7 ... Výroba v době dopoledního útlumu	34
Tabulka 8 ... Hodnoty z odpoledního měření.....	35
Tabulka 9 ... Odpolední ztráty.....	35
Tabulka 10 ... Výroba v době odpoledního útlumu	35
Tabulka 11 ... Suma dopoledních ztrát.....	36
Tabulka 12 ... Suma odpoledních ztrát.....	36
Tabulka 13 ... Suma nekorigovaných ztrát.....	36
Tabulka 14 ... Přehled denní výroby	37
Tabulka 15 ... Hledané korigované ztráty za zimní měsíce	38

Úvod

V současné době je vyvíjen politický a společenský tlak na přechod z fosilních paliv na obnovitelné zdroje energie v důsledku zvyšování emisí a znečištění životního prostředí. Do popředí se v této tématice tak dostala generace elektrické energie ze slunečního svitu, která spolu s dalšími zdroji energie – vodní, větrná, energie přílivu, biomasa a jaderná energie – budou v budoucnu tvořit standardní zdroje energie. Současnými závaznými cílem, stanoveným EU do roku 2030, je 20-32% podíl OZE v energetice. Různé zdroje se v tomto ohledu liší, hlavně v závislosti na politice. V tomto hledisku se do popředí dostává využívání a zlevňování technologií fotovoltaických článků.

FV články a panely jsou snadným řešením, jak zajistit výrobu z obnovitelného zdroje energie. Slunce poskytuje v této kategorii ohromné množství energie zadarmo na příštích několik miliard let, ergo, je tedy v rámci lidského bytí nevyčerpatelné.

FVE se tak rozšířily do popředí nejen ve velkých instalacích, kdy je instalovaný výkon elektrárny ve stovkách kW až desítek MW, ale hlavně v domácích instalacích a ostrovních systémech, kde tento výkon dosahuje jednotek kW. Vhodným umístěním jsou střechy, popřípadě fasády budov. Na těchto místech FVE nezabírají žádné potenciálně užívané místo.

Dalším primárním systémem užití jsou off-grid systémy. Jedná se o ostrovní provozy, které jsou nezávislé na síti a energii musí čerpat alternativně. Nejčastěji se takovýto systém skládá z několika zdrojů energie – vodní, větrný a solární. Právě solární zdroj je nejsnadnější na instalaci a ke svému provozu vyžaduje pouze bezoblačnou oblohu. Off-grid systémy pokrývají přímou spotřebu energie, nebo uskládají energii do baterií a následně ji spotřebovávají. Spotřeba pak není omezená jen na slunečnou oblohu, ale i na kapacitu baterií. Tyto systémy využívají chataři, lidé žijící takzvaně mimo civilizaci, nebo i systémy veřejného osvětlení.

Takovým příkladem je i popisovaný systém veřejného osvětlení, jehož FV část je zkoumáním této práce. Všechny FVE mají, kromě zatažené oblohy, nepřítele v podobě špíny a sněhových srážek. Právě sněhové srážky je nutno odstraňovat, neboť sněhem zakrytý panel nevyrábí energii.

Otázkou tak je, jak se k takovému problému postavit. Panely je buď nutno čistit ručně, nebo pomocí výhřevných jednotek. Třetí možností je počkat, jestli sníh přirozeně odtaje a uvolní tak panel. První 2 způsoby vyžadují investici času a peněz do čištění, kdežto třetí je zadarmo. Je však otázkou, zda je systém dostatečně výdělečný a zda-li lze případné ztráty v takovémto systému oželeť. FVE umístěné na výškách a na odlehlých místech nelze snadno obsluhovat a udržovat.

Z toho důvodu je vhodné provést v nejbližším časovém horizontu měření v zájmových měsících a srovnat podíly výroby a z nich odhadnout ztráty. Takový systém lze pak optimalizovat pro maximální možný zisk energie.

1 Základy Fotovoltaiky

Využití sluneční energie je z praktického ohledu důležité, neboť je to energie „zdarma“. Pokud budeme brát v potaz fosilní paliva (ropa, uhlí, zemní plyn), jejich energie je uzamčená v chemických vazbách mezi jednotlivými molekulami té či oné látky. Jediný známý způsob, jak tuto energii uvolnit, je tepelným rozkladem – spalováním. Tato energie je vyzářená ve formě odpadního tepla, a toto odpadní teplo je využito pro přeměnu vody v páru, která se následně využije k roztočení turbíny připojené k alternátoru, který produkuje energii pomocí elektromagnetické indukce. Tento proces je technologicky náročný a je při něm vyprodukováni signifikantní množství skleníkových plynů, které se staly světovým problémem v důsledku rozsáhlých klimatických změn.

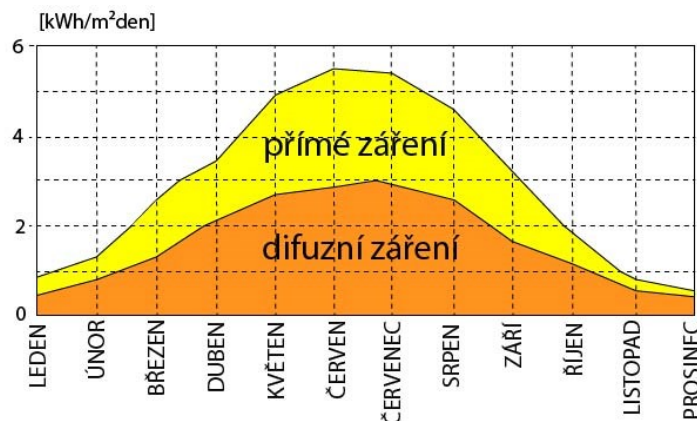
Jak již bylo zmíněno, sluneční energie je volně k dispozici ve formě slunečního světla, které je vedlejším produktem jaderné syntézy probíhající na slunci. Pokud zachycujeme toto světelné záření pomocí fotovoltaických článků, „čerpáme“ elektrickou energii přímo, bez mnoha mezistupňů energetických přeměn. Výhodou tohoto způsobu výroby energie jsou snížené emise skleníkových plynů. Dalším plusem je možnost miniaturizace FV panelů a využití na malých plochách, jako střechy nebo povrchy satelitů.

1.1 Světlo

Světlo je viditelná část elektromagnetického záření, lidským okem zaznamatelné na vlnové délce λ od 390nm do 760nm. Pro světlo platí tzv. dualita částice a vlnění. Znamená to, že se chová zároveň jako vlna i jako částice, nazvaná foton. Ten je nositelem energie, kterou se za pomoci FV snažíme zachytit a využít.[14]

Světlo dopadající na povrch planety je nutno rozdělit do třech kategorií: [7][9]

- **Přímé světlo** – nedochází k žádné změně jeho intenzity při průchodu atmosférou
- **Difúzní světlo** – při průchodu atmosférou dojde k poklesu jeho intenzity v důsledku vlivu plynů, vodních par a volných polétavých částic znečišťujících atmosféru. Energetický potenciál takového světla je tedy snížený.
- **Odražené světlo** – světlo odražené od okolních ploch. Nutno dodat, že pokud by se jednalo o světlo přicházející z vesmíru, tak hlavním zdrojem takového světla je Měsíc. Pokud bereme v potaz světlo odražené již na zemi, pak tvoří toto světlo každá plocha schopná světlo odrážet.



Obrázek 1 ... Poměr závislosti přímého a difuzního záření na ročním období [1][7]

„V letním období tvoří difúzní záření přibližně polovinu záření globálního. V zimě je díky častému oblačnému počasí tento podíl podstatně vyšší. V celoročním průměru obnáší podíl difúzního záření asi 60 %.“[7]

Pro země ležící v mírném až polárním pásu tento graf nebude platit přímo. Je to dáno zvýšeným počtem srážek, nižším počtem slunečních dnu, kratšími dny a níže položenou polohou slunce. K difuzi světla přispívá i znečištění okolního prostředí. To je vyjádřeno součinitelem znečištění Z . V závislosti na míře znečištění může dojít k útlumu slunečního svitu mezi 5-10 % [1][7][8]

Intenzita dopadajícího světla na zemský povrch se může různit, roli zde hrají odlišné měřicí metody a proměnlivost ve sluneční aktivitě. V maximu je tato hodnota udávána jako $I_0 = 1360 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Tato hodnota je udává pro vakuum. Po průchodu atmosférou Země tato hodnota klesá, a její běžně udávána hodnota je $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. V závislosti na zeměpisné lokalitě je pak konstanta zpřesněna pro výpočty vyžadující přesné vstupní hodnoty. [1][7][8]

Z této hodnoty lze dopočítat velikost přímého a difuzního záření, protože zdánlivě dobře osvětlená lokalita se může ukázat jako nevhodná pro výstavbu a aplikaci FV elektrárny, neboť zdejší světlo může být z větší části difuzní, nebo odražené. Současné technologie použité při výrobě dovolují operovat panelům i s větším množstvím difuzního. Takovým příkladem může být FV panel vyrobený z amorfního křemíku. [1]

Intenzita přímého slunečního záření dopadající na kolmou plochu k paprskům [8][14]

$$I_{PN} = I_0 \cdot A^{-z} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (1)$$

Pro plochu o obecné poloze pak platí: [8][14]

$$I_P = I_{PN} \cdot \cos \gamma [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2)$$

kde

γ – úhel dopadu slunečních paprsků

Jestliže si nelze vystačit se základními vzorci pro výpočet intenzity slunečního záření, musí se vypočítat intenzita z následujících vzorců, ve kterých rozdělujeme jednotlivé složky slunečního záření po průchodu atmosférou. [1]

Přímé sluneční záření: [1]

$$I_{PZ} = I_S \cdot e^{-a \cdot m \cdot T} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (3)$$

I_{PZ} - intenzita slunečního záření

I_S - aktuální hodnota solární konstanty

e - Eulerovo číslo

a - koeficient Rayleighova absolutně čisté a suché atmosféry

m - poměrná optická tloušťka atmosféry

T - Linkeho faktor znečištění atmosféry

Difuzní sluneční záření [1]

$$I_{DZ} = (0,22 + 0,025T) \cdot (I_S - I_{PZ}) \cdot \sin h_0 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (4)$$

I_{DZ} - intenzita difuzního záření

I_{PZ} - intenzita přímého slunečního záření

I_S - aktuální hodnota solární konstanty

h_0 - elevační výška slunce

T - Linkeho faktor znečištění atmosféry

Odražené sluneční záření [1]

$$I_O = 0,5 \cdot \rho \cdot (1 - \cos \gamma) \cdot (I_{DZ} + I_{PZ} \cdot \sin h_0) \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (5)$$

I_O - intenzita difuzního záření

I_{DZ} - intenzita difuzního záření

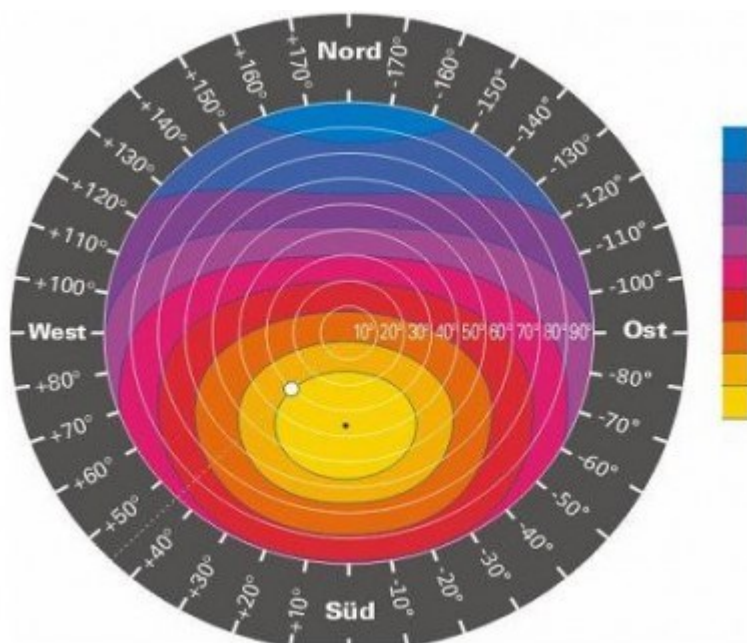
I_{PZ} - intenzita přímého slunečního záření

ρ - koeficient odrazivosti okolního terénu

γ - úhel sklonu posuzované roviny

1.1.1 Optimalizace umístění

Optimálním umístěním fotovoltaického systému rozumíme takovou orientaci a sklon, která nám zajistí maximální výnos ze systému v průběhu celého roku. V podmínkách české republiky se jedná o **sklon cca 35st. a orientaci přímo k jihu**. Neznamená to ovšem, že pokud bude střecha orientovaná např. k západu a sklon bude o 20st. menší, nebude takový systém ekonomický vůbec přínosný. Výnosy z takových systému budou samozřejmě nižší. Nejlépe uvidíme vliv sklonu a orientace na možné výnosy z následujícího grafu s modelovým příkladem. (30°sklon/45° jihozápad = výtěžnost 95%) [2]



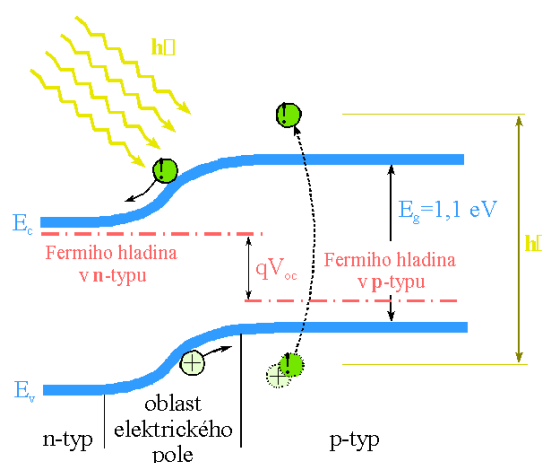
Obrázek 2 ... Diagram optimálního postavení FV panelů vůči slunci [2]

Barevná legenda ukazuje procentuální výnosnost při postavení panelu vůči světovým stranám a úhlem náklonu. Modrá je nejnižší účinnost (5-10%), červená je cca. 50% a žlutá největší (85-95%).

Důležitým faktorem pro výnosy z fotovoltaické elektrárny je vliv zastínění. Ten se mnohdy podceňuje a například i zdánlivě banální zastínění od antény nebo bleskosvodu může mít vliv na celkové výnosy v řádu procent až desítek procent. Je tedy třeba brát na zřetel všechny potencionální vlivy zastínění, jako jsou sloupy, stromy, antény nebo i dráty elektrického vedení. Podstatný vliv zastínění na výnosy je dán hlavně fyzikální podstatou funkce FV článku. Pokud dojde k zastínění byť jen jediného článku na fotovoltaickém panelu, začne se tento článek chovat jako odpor a „brzdí“ tok elektrické energie ve všech ostatních článcích, případně panelech spojených v jedné větvi (sérii). Je tedy opravdu důležité vyhnout se případnému zastínění jak jen je to možné. [2]

1.2 Fotoelektrický jev

Fotoelektrický jev nastává, narazí-li foton do povrchu kovu. Při této srážce foton předá svoji energii elektronu, který je následně uvolněn z krystalické mřížky a vytvoří v ní kladným náboj, tzv. „díru“. Elektron se následně rychle vrací na své původní místo a při této rekombinaci vyzáří přebytečnou energii do okolí jako teplo. U kovu k tomuto ději dochází velice rychle a je ve FV technice nežádoucí. Pro polovodiče je tento děj pomalejší a lépe ovlivnitelný, díky tomu jsme schopni využít energii fotonu jako elektrickou. Dojde k separaci díky P-N přechodu, neboť elektron se v excitovaném stavu po čase vrátí na své původní místo, díky vlastnostem přechodu je elektron přemístěn na jinou pozici a tím je uskutečněn přenos proudu. [10][14]



Obrázek 3 ... Přechod elektronu z valenčního pásma do vodivostního po osvětlení [10]

1.3 Využití ve fotovoltaice

Typickým představitelem polovodiče ve FV technice je Křemík (Si), díky jeho vazebním vlastnostem na ostatní atomy. V kovalentní vazbě s ostatními látkami zaměstnává 4 elektrony a pro další interakce mu nezbyvá žádný. Na rozbití této vazby však stačí malé množství energie, konkrétně 1,1 eV, což je také zisk energie ze slunečního záření. Pokud je energie menší jak 1,1 eV, foton projde materiálem křemíku a je nevstřebán. Pokud je energie větší, přebytečná energie je vyzářena do okolí jako ztrátové teplo. Vstřebatelná energie se odvíjí od použitého materiálu. Jsou materiály, které dokážou přeměnit i větší energii fotonů, ale účinnost konverze je nižší, tedy celkový zisk energie je menší než u křemíku. Tyto materiály stále podléhají výzkumu pro jejich optimální využití. [8][10][14]

Toto je největší limitací klasických Si panelů. Existují sloučeniny, které potřebují na uvolnění elektronu do vyšší vodivostní vrstvy větší množství energie, ale takové látky jsou ve stádiu vývoje a náročné na výrobu. Taktéž existují i sloučeniny, které potřebují menší množství energie, jsou běžně používané pro konstrukci tandemových FV článků, nicméně jejich účinnost je neúměrně menší než možný výnos energie [4][10][14]

2 Základy Fotovoltaiky

Pokud má být fotovoltaika převedena do praxe, je zapotřebí takové zařízení – článek – které umí převést sluneční energii na elektrickou. Takové zařízení nazýváme fotovoltaický článek.

2.1 Fotovoltaický článek

FV článek není ze své podstaty nic jiného, nežli dioda s velkou plochu P-N přechodu, která má svůj pracovní bod ve IV. Kvadrantu V-A charakteristiky, na který dopadá sluneční záření.

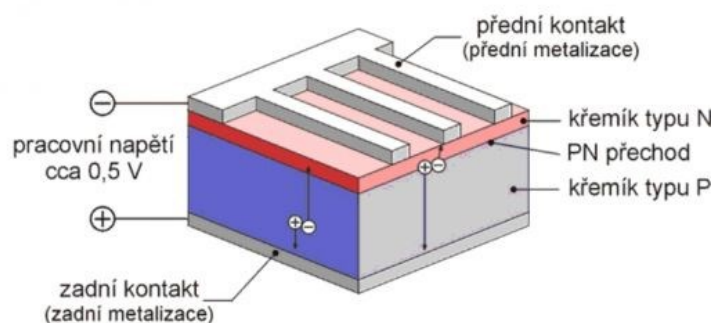
Křemík je řazen mezi polovodiče, protože se chová jako izolant, ale i jako vodič. Pokud budeme chtít, aby se choval jako vodič, je nutné zvýšit jeho vodivost. Za tímto účelem je křemík nutné dotovat látkami pro vytvoření tzv. P-N přechodu. Vzniká tak rozhraní, kde jedné látky přebývá jeden elektron - negativní vazba N, nejčastěji křemík dotovaný fosforem a k dispozici je 5 elektronů ve vazbě. Druhé zase chybí jeden elektron (pozitivní vazba P) – vzniká díra a ve vazbě jsou pouze 3 elektrony, příkladem je křemík dotovaný borem.

Rozlišujeme mezi dvěma typy P-N přechodu. Vždy máme jednu vrstvu materiálu mnohonásobně hrubší než tu druhou. Nejvíce používaným je varianta s hrubou vrstvou P materiálu. Výzkumem však bylo dokázáno, že výhodnější by bylo použití hrubé vrstvy N materiálu. Ten totiž vykazuje stabilnější vlastnosti při generaci elektrického proudu a při zvyšování okolní teploty, a i teploty článku. Podléhá také pomalejšímu opotřebení vlivem slunečního záření. [18]

Povrch P-N přechodu bývá opatřen antireflexní vrstvou. Stejně jako samotný P-N přechod není dokonalé hladký, tak i povrch bývá narušen. Toto umělé narušení je vytvořeno naleptáváním materiálů. Dojde tak k vytvoření útvarů v podobě pyramid nebo obrácených pyramid. Takovýto povrch odráží v menším množství světlo a maximalizuje výnosnost FV článku. Je tím zároveň i zvětšena plocha P-N přechodu. [14]

Článek je ze shora i ze spod vybaven elektrickými kontakty, které uzavírají elektrický obvod. Ze spod článku tyto kontakty bývají přiložené na šířku k přechodu. Na svrchní straně jsou buď opět přiloženy na šířku, anebo jsou do P-N přechodu vnořené, aby se zmenšilo místo překrytí. Použití závisí na technologických postupech výrobce. Šířka kontaktů se pohybuje v rozmezí 150-200 μ m [13]

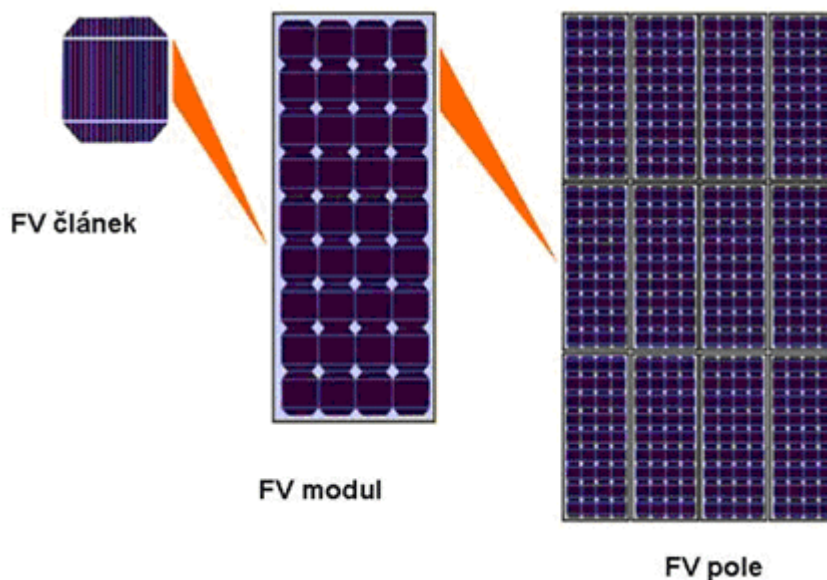
Svrchní část panelu je překryta EVA fólií, na tu je pak nanášeno průhledné tvrzené sklo, které chrání panel před povětrnostními a atmosférickými podmínkami. Sklo a fólii musíme volit takovou, aby propouštěla co nejširší spektrum záření. Spodní část panelů je uzavřena v plastových fóliích (PP, PET, PVF) nebo v další vrstvě tvrzeného skla. Celek je pak uzavřen v hliníkovém rámu a jako výsledný modul osazen na zadní straně svorkovnicí a je mu vystaven štítek s mechanickými a elektrickými vlastnostmi.[18]



Obrázek 4 ... Průřez konstrukcí FV článku [2]

Při pokojové teplotě dochází v takovémto přechodu k výměnám elektronů i bez přímé excitace fotony. Pokud je polovodič s P-N přechodem vystaven slunečnímu záření, tento přirozený děj je urychlen a elektrony začnou přeskakovat ve větší míře. Dochází tak k výměně volných elektronů na rozhraní a přesunu nabitých částic ke kontaktům. To má za následek vznik elektrického potenciálu a vytvoření ustáleného toku elektronů – stejnosměrného elektrického proudu – je-li na článek připojena zátěž.

Získané napětí na jednotlivých článcích je malé, pouze okolo 0,5-0,6V (dáno vlastnostmi křemíku). Jednotlivé články se proto spojují do série a tvoří tak FV panely. Počet článků v panelu se může různit v závislosti na výrobci, všeobecným cílem je však dosáhnout takového napětí, se kterým se dá již normálně pracovat. Pro zvýšení výkonu samotné FVE jsou pak tyto panely zapojovány paralelně a dochází ke zvětšení jmenovitého výkonu takového systému.

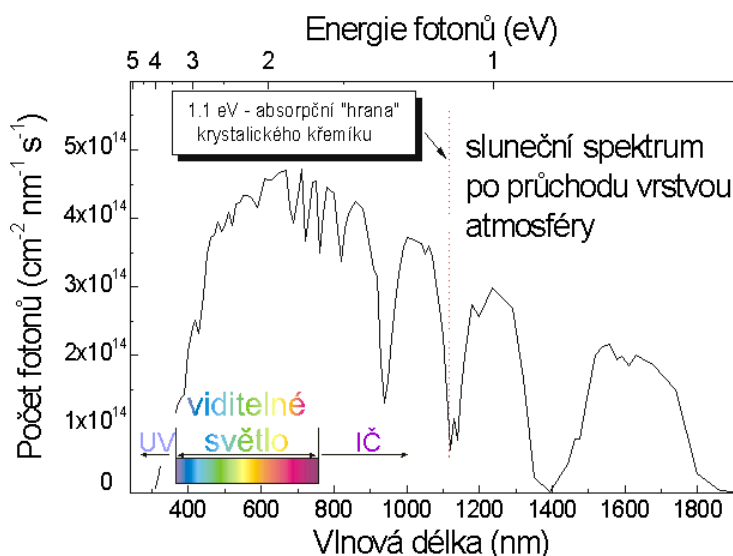


Obrázek 5 ... Skládání FV článků do větších celků [11]

2.2 Limitace

Maximální efektivní využití FV článku je dáno takzvaným Shockleyho-Quisserovým limitem. Ten udává, že při teplotě 25°C a vyzařování absolutně černého tělesa při teplotě 6000K je účinnost standardních Si FV článků maximálně 30% při získaném napětí 0,5-0,6V ve spektru světla kolem 1100nm (1,1eV). [10][13]

Shockleyho-Quisserový limit je počítán pouze pro jednu vrstvu polovodičového materiálu. Umístěním dvou anebo více vrstev **stejného** polovodičového materiálu nad sebe efektivitu článku nezvýší, naopak, vzhledem k množství vrstev v článku dojde k poklesu efektivnosti přeměny [10]



Obrázek 6 ... Využitelné spektrum slunečního záření pro Si FV panel [10]

Dalším velkým omezením je teplota materiálu. Pokud dojde k nárůstu teploty, zvětší se pohyb volných elementů ve vodiči, což bude mít za následek zvětšení odporu materiálu, který sice vyvolá menší navýšení hodnoty protékajícího proudu, ale taktéž způsobí pokles napětí. V konečném důsledku tak dojde ke snížení optimálního dodávaného výkonu článkem. [10][14]

„U panelů s články z monokrystalického a polykrystalického křemíku se s rostoucí teplotou panelů zhoršuje jejich účinnost. U panelů z amorfního křemíku je pokles účinnosti s teplotou méně výrazný. Ve všech sledovaných FVE byly použity panely s články z monokrystalického křemíku. Lze vysledovat trend nižší produkce u panelů umístěných na fasádě oproti panelům s dobře ochlazenou zadní stranou. Tento trend potvrzuje výše uvedený předpoklad poklesu produkce při vyšší teplotě. Jiný trend ukazuje nižší účinnost panelů v zimních měsících, což ukazuje na skutečnost, že použité monokrystalické panely lépe zpracovávají přímé záření nežli difuzní, které v zimních měsících převažuje.“ [14]

2.3 Vliv Sněhové pokrývky a námrazy

Jedním z limitujících faktorů (krom Shockley-Quiseroveho limitu) je vliv nízké teploty. FV články jsou stavěny na určitou operační teplotu, tj. že při vysokých teplotách roste jeho elektrický odpor a při příliš nízkých teplotách materiál ztrácí ideální polovodivé vlastnosti. Leč je stav podchlazení pro články při extrémně nízkých teplotách, v tuzemsku dosáhneme v zimních měsících takových teplot, které jsou stále pro provoz článků optimální, dokonce lze říci, prospěšné. S nízkými teplotami se ovšem pojí daleko závažnější problém, a to je namrzání a sníh

Namrzání i sněhová pokrývka blokují průchozí světlo a snižují tím výkon FVE, protože na panel dopadá menší množství slunečních paprsků, anebo jsou paprsky rozptýleny.

Namrzání může tvořit pouhé kapičky, ale taky souvislou vrstvu. Je však závislé na okolních podmínkách. V chladných měsících bude mít panel vždy nižší teplotu než okolí (pokud nedojde k ohřátí „černé“ vrstvy a k prohřátí panelu), proto se bude rosit a následná vysrážená vlhkost bude tvořit kousky ledu, které začnou pokrývat panel a budou přitahovat další vzdušnou vlhkost, která se na ně bude nabalovat. Dalším možností je námraza způsobena mlhou. Třetí možností je přímá sublimace na povrchu panelu. Poslední možnost vytvoření námrazy je ztuhnutí sněhu na led, pokud bude panel pokryt dostatečnou vrstvou sněhu po dostatečně dlouhou dobu.

Pokud jsou atmosférické podmínky vlídné, vzniklá námraza se může odpařit nebo rozpustit a panel tak naběhne do normálního provozního stavu. Pojí se to k dennímu cyklu, kdy panel v noci namrzne a přes den na slunci opět rozmrzne. Přesto dokáže námraza snížit výkon panelu i o více jak 50% (záleží na povrchu vzniklé námrazy, jestli se jedná o celistvou vrstvu, nebo hrbatou, nebo jinak zdeformovanou). [22]

Větším problémem je již sněhová pokrývka. Ta již při vrstvě do 2 cm dokáže zablokovat i 70% slunečního záření. S rostoucí vrstvou sněhu toto číslo roste. Jde však o individuální hodnoty, neboť různé technologie, použité při výrobě FV panelu, mohou reagovat různě a mohou propouštět více konvertibilního záření. Propustnost sněhové pokrývky se také odvíjí od toho, o jaký typ sněhu se jedná. Pokud je to lehký poprášek sněhu, suchý sníh anebo navátý sníh, propustnost bude relativně velká. Jestliže to bude těžký a mokrá sníh, propustnost bude nízká a bude taktéž docházet k velké difuzi světla díky roztáté vodě, která se ve sněhové směsi bude nacházet. Velká masa sněhu může panel poškodit i mechanicky – prasknutí ochranných prvků, prohnutí konstrukce, rozlomení FV článku. [22]

Jelikož sněžení nelze zabránit, je nutno sněhovou vrstvu odstranit. To je buď uděláno manuálně, což se nedoporučuje, neboť může dojít k poškození panelu (svrchní vrstvu může tvořit sklo, převážně se však jedná o EVA fólie). Přirozeným čistícím mechanismem je odtávání sněhu. Sluneční paprsky zahřejí sníh a černou vrchní vrstvu panelu, vytvoří se tenká vrstva vody a poté masa sněhu sklouzne. Tomu dopomáhá i optimální sklon panelu kolem 40% (běžné pro naše podmínky, viz Obrázek 2). Tato samočistící funkce dále zbavuje i panel nečistot [18][22][24]

2.4 Technické rozdělení FV článků

FV články jsou zde více jak půl století a za tu dobu si prošly značným vývojem. Každá další generace článků měla vyšší účinnost, nebo byla levnější na výrobu. Měnila se jejich konstrukce, ale i použité materiály.

2.4.1 Konstrukce

Klasická konstrukce – Tento typ konstrukce je popsán již v kapitole 3.1., pro zopakování: P-N přechod je uzavřen mezi dvě elektrody, svrchní strana uzavřená v EVA fólii a tvrzeném sklu, spodní strana uzavřená plastovými fóliemi nebo sklem. [18]

Tento typ konstrukce je široce výrobci modifikován. Typickými modifikacemi je nahrazení spodní vrstvy PVC za reflexní vrstvu, odrážející zpět neabsorbované fotony, zvyšující účinnost článku o několik procent. Jak již bylo zmíněno, vrchní vrstva křemíku bývá narušována do podoby „vrcholů“, aby vznikla antireflexní vrstva a byla maximalizována plocha povrchu. Tento postup je relativně nový, dříve se používal hladký křemík, překrytý antireflexní fólií. Hojně používanou konstrukcí je od 80. let tzv. „PERL“. Povrch je pokryt mřížkou z obrácených pyramid, soustřeďující dopadající záření na křemík, zároveň se však disponuje antireflexní, což ho činí vysoce výdělečným. Typická účinnost kombinací těchto technologií se pohybuje od 16 až do 24%. Speciálními konstrukcemi lze tuto účinnost dostat až ke 27%, což se blíží stropu efektivnosti křemíku [5][13][19]

Tenkovrstvé – Vychází z aplikace amorfního křemíku. Typická tloušťka tenkovrstvých článků se pohybuje od 300nm až po jednotky mikrometrů. Tyto články mají nízkou účinnost, většinou je to 6-10%. Výrobní náklady jsou tak nízké, že se vyplatí pokrytí velkých ploch takovýmito panely, tedy se ekonomicky vyplatí jejich provoz. Tenká vrstva amorfního křemíku se naparí na skleněný nebo ohebný podklad, laserem se poté vyřeže místo pro elektrody. Následně se článek opatří plastovou fólií pro ochranu.

S takovýmito panely se běžně dá setkat v komerčních zařízeních nebo ve spotřebním zboží, jako je příruční elektronika (kalkulačky) atd.... Tenkovrstvé panely navíc ze zákona výjimky a mohou být umístěny do lokací CHKO, kde klasické panely být nemohou. Takovýto panel se dá vyrobit i ve formě rolovatelného koberce, který se dá umístit na povrchy střech i dalších špatně přístupných míst. Spolu s polykrystalickým křemíkem tvoří páteř osobního konzumu FV panelů [2][5][19]

Organické – Experimentální články s velice nízkou účinností, která se postupně zvyšuje, stěží však při optimálních podmínkách provozu překračují více jak 11% účinnosti. Složením jsou látky tvořící článek různé polymery, citlivé na různé části slunečního spektra. Klíčovými materiály jsou polymery P3HT, PCPDTBT, PCBM, PC70BM. Ke konverzi energie dochází v okolí heteropřechodů vytvořených sloučeninami PCPDTBT:PCBM pro infračervené i ultrafialové záření a P3HT:PC70BM pro viditelné spektrum světla. [4]

Články jsou většinou zapojeny v tandemovém uspořádání, aby byla dosažena optimálního spojení polymerů a citlivosti na světlo.

Do této technologie jsou vkládány velké naděje, neboť tento typ článků by mohl nahradit tenkovrstvé články. Dále by bylo možno tyto články vyrábět v domácích podmínkách pro všelijaká osobní využití. Nevýhodou je nestálost polymerů a rychlá degradace článků. [4]

*„K této kategorii by se daly započítat **Perovskity**. Jde organicko-anorganickou sloučeninu perovskitových slunečních článků s chemickým vzorcem $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$, kde X je Cl, Br nebo I. První pokusy provedla skupina prof. Miyazaky v roce 2009 a získala účinnost 3,8 %. Od té doby se hodnoty dosažené účinnosti mimořádně rychle zvyšují. Optimalizací přípravy a struktury článku se podařilo dosáhnout aktuální rekordní účinnosti 22,7 % ve skupině prof. Seoka. Tato hodnota je o to pozoruhodnější, uvědomíme-li si, že se jedná o jen 200–300 nm tlusté aktivní vrstvy připravované z roztoků za běžných teplot (do 100° C). Perovskity by se tak mohly stát základem pro levnou a jednoduchou výrobu velmi účinných slunečních článků. [4][13]*

Na druhou stranu je třeba zdůraznit, že perovskitové sluneční články mají i své nedostatky. Prvním zásadním problémem je interakce se vzdušnou vlhkostí, která způsobuje chemický rozklad perovskitové struktury, čímž se obvykle na časové škále měsíců postupně snižuje výsledná účinnost fotovoltaické přeměny. Druhým problémem je obsah těžkého kovu – olova, které může být i přes relativně malé používané množství potenciálně nebezpečné. “[4][13]

Tandemové – Tandemové FV články jsou speciálně zkonstruovány, aby využívaly co největší část slunečního spektra. Z konstrukčního hlediska se jedná o navrstvení n vrstev PN přechodů, kde každá vrstva je uzpůsobena pro reakci s jinou vlnovou délkou světla. Tyto vrstvy jsou pak prokládány elektrodami, přehraničující jednotlivé PN přechody, anebo vrstvy článku uzpůsobeny tak, aby elektrony prošly skrze všechny vrstvy ke spodní elektrodě.

Pro konstrukci se používají buď čistě Si články, kde každá vrstva je jinak dotovaná a reaguje s jinými vlnovými délkami spektra, anebo, což je častější, se kombinují různé technologie (Si, CIGS, GaAs ...), opět, každá vrstva citlivá na různou vlnovou délku.

Takovéto články mají extrémně vysoké účinnosti, odvíjející se od počtu použitých vrstev. Čistě Si tandemové články o počtu 4 vrstev dokázaly v nedávné době projít testem s výsledkem 46% účinnosti. Kombinací různých materiálů by měla být dosažena účinnost až 60% a více.

Problém takovýchto článků je jejich závratná cena a kompabilita technologií [4]

Koncentrační – Poslední z významných typů konstrukcí. Pomocí série reflektorů nebo čočky je sluneční záření nasměrováno do malého bodu PN přechodu. Zvedá se tak účinnost systému, zároveň vyvstává otázka chlazení, neboť dochází k rychlému ohřevu na vysoké teploty a následnému snížení efektivity článku. Vyvíjené teploty dokážou snad PN přechod poškodit a degradovat. Další nevýhodou je použití pouze přímého slunečního záření. Ideální umístění takovýchto panelů je v horských oblastech nad oblačností, kde je zajištěn dostatek přímého záření, přirozené chlazení a mohou být provozovány s dostatkem generované energie v ostrovních systémech [4][8]

2.4.2 Použitý materiál

Majoritním zastupitelem pro výrobu FV článků a panelů je **monokrystalický křemík**. Tato forma křemíků stála u vývoje první generace FV článků kvůli svým technickým vlastnostem, jako je vysoká efektivita konverze a zpracovatelnost pro P-N přechody a snadná úprava povrchu. Takovýto článek má účinnost okolo 25%. Vyrábí se převážně pomocí Czochralského metody, ta je energeticky náročná a trvá dlouho. Přes tyto zjevné nevýhody, metoda poskytuje nejkvalitnější monokrystalický křemík, a tudíž se její aplikace vyplatí. Protože roste světová poptávka po křemíku, začaly se vyrábět levnější varianty křemíku – **monokrystalický** a **polykrystalický**. Polykrystalický křemík tvoří více krystalů křemíku, je levnější, ale má horší vlastnosti. Články vyrobené z takového křemíku mají účinnost kolem 17-20%. Polykrystalický křemík je ještě méně účinná forma, s účinností kolem 10% a vyrábí se napařováním křemíků na skleněné tabule. Výhodou je velice tenká výrobní vrstva (obvykle mikrometr) a nízké pořizovací náklady, to vše za malou účinnost. Typickým představitelem tohoto křemíku je FV článek v kalkulačkách, lze ho nalézt i poměrně často v domovních instalacích. Důvodem je nižší pořizovací cena. [3][19][20]

Dalšími používanými sloučeninami jsou **Arsenid Galia GaAs**. Takovýto materiál je ale nákladný na výrobu, čemuž odpovídá i vysoká pořizovací cena. Účinnost článku vyrobeného z tohoto materiálu se v současnosti pohybuje lehce nad maximální možnou účinností křemíku, tedy okolo 30%. S takovými články se lze sehnat u vesmírných sond. [3][19]

Do kategorie experimentálních materiálů se řadí sloučeniny **CIGS** (CdTe a CuInSe), spolu s organickými sloučeninami a kvantovými pastmi, vyrobených z uhlíku. Účinnost takovýchto článků je přes 40%, syntéza materiálu a následná konstrukce převyšuje únosné pořizovací náklady. Proto je tato technologie zatím pro komerční nasazení nedostupná. [19]

3 Potenciál Fotovoltaických elektráren v ČR

Velký vzestup fotovoltaické energie nastal mezi léty 2008-2012 při rozšíření dotačních programů na výstavbu FVE. Tento program byl dále zastřešen energetickými balíčky EU, zavazující se postupný přechod na obnovitelné zdroje energie, kdy každá členská země v časových plánech obdržela doporučenou hodnotu podílu vyrobené energie z OZ.

Během tohoto období došlo k prudkému navýšení cen FV článků, neboť celosvětově vzrostla cena monokrystalického křemíku, ze kterého se FV články vyrábí, v důsledku zvýšené poptávky. Projekty výstavby FVE musely být kryté jak z evropských, tak státních podpor, s garantovanou podporu provozu a zvýhodněného odkupu vyrobené silové elektřiny, aby se provoz elektráren ekonomicky vyplatil. Počet FVE se zvýšil závratným tempem, následovaný prudkým útlumem ve výstavbě nových FVE, doprovázený kauzy solárních baronů s podvodným financováním projektů

Nutno dodat, že tyto aféry zasáhly FVE na úrovni průmyslového měřítka. Pro výrobu v domácích podmínkách, na kterou je cíleno v současnosti, to nemělo větší vliv. Již od pohledu se tedy lze setkat s trendem posledních let, kdy majitelé nových staveb, ale i staveb stávajících či podléhajících rekonstrukci, budují na svých střechách solární panely, které využívají pro provoz svých domácností, ale i k prodeji do sítě.

Z hlediska ekonomiky je takovéto decentralizované budování FVE výhodné, neboť jsou zužitkovány jinak nevyužité plochy střech či fasád budov, dále nejsou zbytečně zaplňovány plochy luk a lesů, a spotřebitelé se zároveň stávají producenty elektrické energie.

To však klade technologické problémy na celkovou rozvodnou i distribuční síť. Musí být tak zajištěno hlídání stavu energetické rovnováhy sítě, neboť FVE jsou nestabilním zdrojem elektrické energie (střídání dne, noci a ročních období, přechodná oblačnost, zhoršené povětrnostní a smogové podmínky, velké výkyvy teplot). Ke slovu tak přichází tzv. „Smart Grids“, které jsou automaticky bez zásahu člověka schopny regulovat výrobu a spotřebu energie. Regulace je však složitá, neboť trvá nějakou dobu uvést elektrárnu do výrobního režimu, a tak se případný nedostatek nebo přebytek energie musí kompenzovat prodejem či nákupem mezi jednotlivým státy dle potřeby.

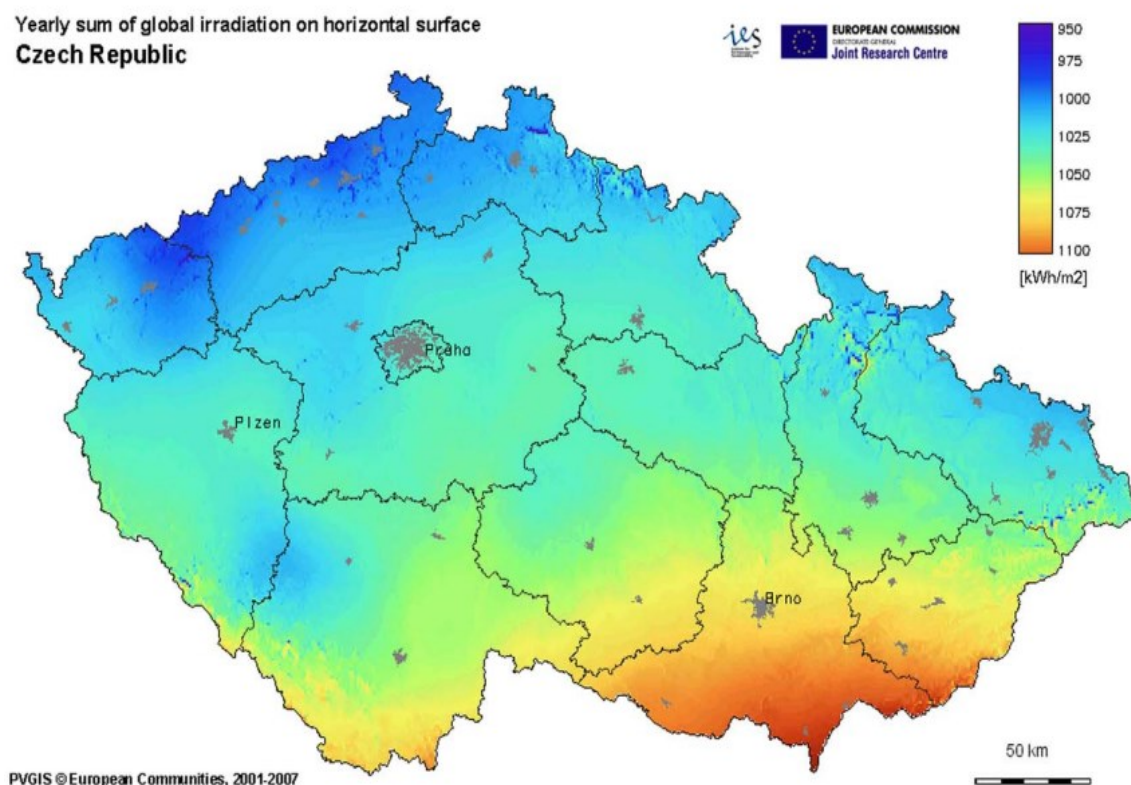
Tento problém řeší akumulátory. Ty v současné době nejsou ale na požadovaném technologickém stupni vývoje, aby byly využitelné. Brání tomu vysoké výrobní náklady, velký dopad na životní prostředí při výrobě a likvidaci akumulátoru (těžké kovy jako Pb, Cd a použití kyselin), a zejména nízká účinnost efektivně skladovat elektrickou energii v dlouhodobém horizontu času. Je experimentováno se skladováním energie ve formě přeměny skleníkových plynů na fosilní palivo, uskladněním pomocí stlačeného plynu nebo uchováním ve formě kinetické či potenciální energie (Vodní dílo Dlouhé Straně / Dalešice). Tyto technologie jsou však stále na počátku vývoje. Jednou z nejeftivnějších variant se momentálně jeví výroba vodíku, který by byl v době nedostatku energie zpětně zpracováván (např. v palivových článcích)

3.1 Dostupná energie

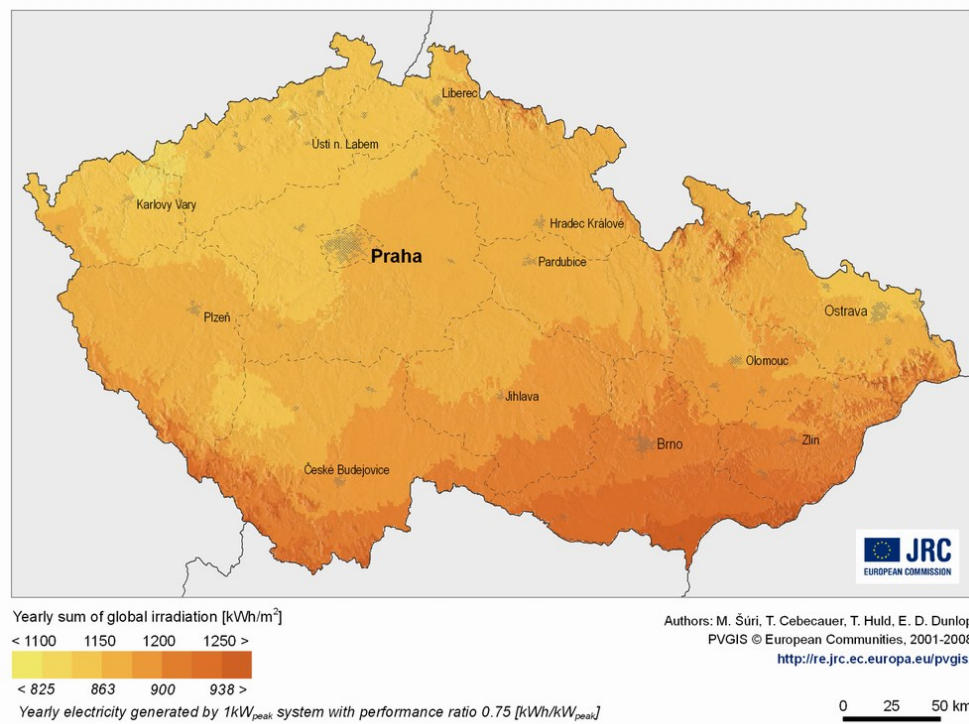
„Česká republika má rozlohu 78 864km². Nadmořská výška jejího povrch z 67% nepřesahuje 500 m.n.m. V oblastech se silně znečištěnou atmosférou je nutné počítat s poklesem globálního záření o 5 - 10 %, v krajních případech až 20%. Pro oblasti s nadmořskou výškou od 700 do 2 000 m.n.m. lze naopak počítat s 5 % nárůstem globálního záření. Teoretický potenciál výroby elektrické energie z energie slunečního záření byl stanoven studií Ministerstva pro místní rozvoj cca 80 000TWh. Tento potenciál je samozřejmě největší potenciálně možný Instalovaný výkon FVE v ČR.“[14]

V České republice dopadne ročně v průměru na 1 m² zhruba 950 - 1100kWh energie. Roční množství slunečních hodin se pak pohybuje od 1331-1792 hodin. Započítáme-li i oblačné dny, podle odborné literatury se toto číslo obecně pohybuje mezi 1000–1500 hodinami ročně.[14]

Na následujících mapách je vyobrazena situace České republiky, ze které určíme potenciálně nejvhodnější lokality pro provoz FVE.

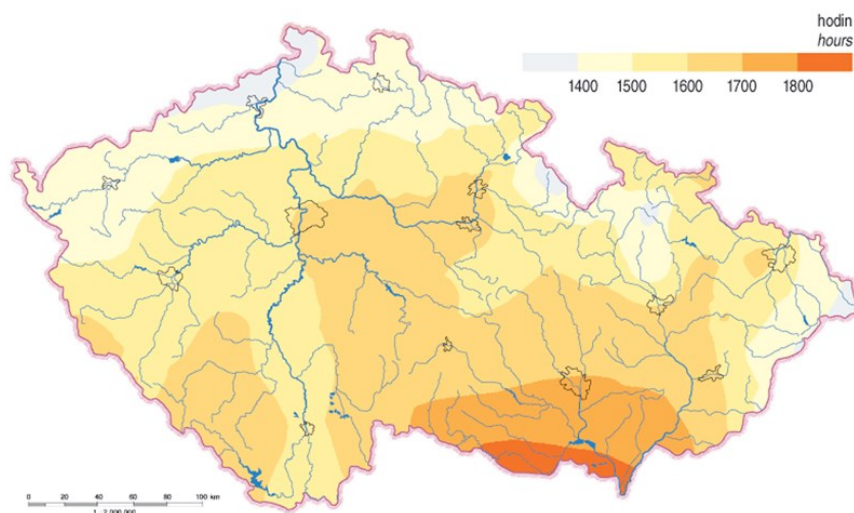


Obrázek 7 ... Roční průměrný úhrn dopadajícího světelného záření na území ČR[7][8]



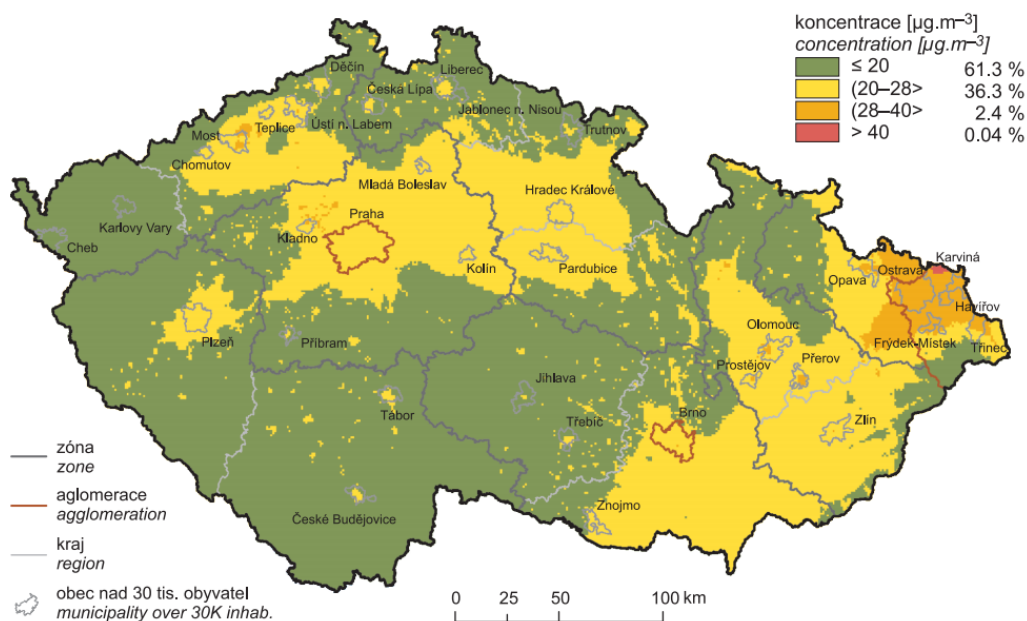
Obrázek 8 ... Průměrný roční výnos FVE o výkonu 1kW_p v ČR [14]

Mapa uvedená výše zahrnuje jak teoretickou maximální výnosnost pro naše zeměpisné podmínky při výrobě energie za ideálních podmínek (rozuměno jako maximální efektivnost systému pracujícího při optimálních podmínkách – optimální napětí a maximální proud), ale zohledňuje i vlivy ponížující optimální provozní podmínky na 75% efektivnosti. To je hodnota, které bývá dosahováno v běžně v praxi. Tyto údaje jsou počítány pro FVE s instalovaným výkonem 1kW_p.

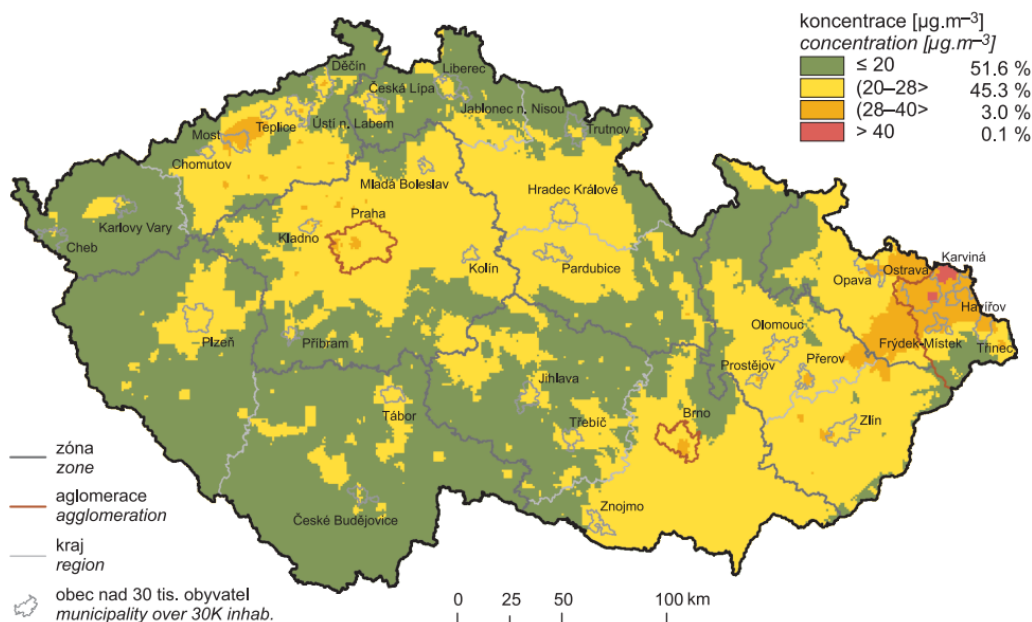


Obrázek 9 ... Délka slunečního svitu na území ČR[3]

Jak lze vidět, nejvhodnější umístění pro FVE se nachází na jižní Moravě. Dalšími vhodnými lokalitami mohou být také střední Čechy. Oproti tomu, průmyslové lokality jako je Ostravsko a přilehlé krajiny, nebo severní oblast republiky, jsou pro provoz vhodné méně, z důvodu menšího úhrnu dopadajícího záření nebo častých zhoršených atmosférických podmínek v důsledku lidské činnosti (smog). Níže jsou přiloženy dvě mapy sumarizující znečištění ovzduší poléťavými částicemi a aerosoly z roku 2018.[5]



Obrázek 10 ... Koncentrace znečištění částicemi $\text{PM}_{2.5}$ z roku 2018 [5]



Obrázek 11... Koncentrace znečištění částicemi PM_{10} z roku 2018 [5]

3.2 Podíl spotřebované energie z FVE

Jak již bylo několikrát zmíněno, výroba a instalovaný výkon FVE zůstává v posledních letech prakticky neměnný (rozdíl v počtu slunečných dnů), můžeme si odvodit jasně na roku 2018 podíl FVE na tuzemském poli

Tabulka 1 ... Celková energetická bilance ČR za rok 2018 [16]

	Brutto [TWh]	Netto [TWh]
Celková tuzemská produkce	88 002	81 902
Tuzemská spotřeba	73 941	62,199
Produkce z FVE	2,339	2,318

Celková brutto výroba v tomto roce činila 88TWh, netto 81,9TWh z toho FVE brutto 2,34TWh a netto 2,32TWh. Tuzemská brutto spotřeba byla 73,9TWh a netto 62,2TWh. Zběžným výpočtem, FVE netvořila ani 3% celkové výroby elektrické energie. Ze statistik se dozvíme, že na celkové produkci i spotřebě se podílely OZE 12,72%. V celkové spotřebě se udává, že FVE tvořila 1% OZE, z toho plyne jasný závěr, že FVE se podílela na spotřebním energetickém mixu zanedbatelně. Připočteme-li stagnaci nárustu instalovaného výkonu, nelze v nejbližších letech očekávat zlepšení. [16]

Pro představu, čtyři největší producenti solární energie na našem území dokázali pokrýt více jak 50% celkové vyrobené sumy. Jedná se o následující kraje:

Tabulka 2 ... Podíl krajů na celkové výrobě energie z FVE za rok 2018 [16]

Kraj	Brutto [GWh]
Jihomoravský	533,9
Středočeský	279,59
Jihočeský	272,06
Plzeňský	230,18

Aktuální instalovaný výkon na území ČR je něco lehce přes 2GWp. Pokud by mohla být využita každá střecha, fasáda nebo znehodnocená krajina, teoretická možná instalace by mohla být až 39GWp. Při současném trendu výstavby nových FV elektráren je však nepravděpodobné, že takového výkonu bude do konce století, zdali, vůbec někdy dosaženo. Nynější optimistické prognózy predikují, že do roku 2040 by mohlo být dosaženo instalovaného výkonu 5,5GWp. [12]

Tabulka 3 ... Technický potenciál FVE v ČR [12]

FVE technický potenciál	instalovaný výkon (GWp)
střechy budov	10,6
fasády budov	13,2
celkem	23,7
brownfieldy	15,3
celkem	39,0

4 Popis a energetická bilance vyšetřované fotovoltaické elektrárny

Zkoumaná FVE je souborem dvou FVE a dvou větrných elektráren, které tvoří off grid systém v areálu VŠB-TOU v Ostravě Porubě. Instalovaný výkon FVE je 220Wp a obě jsou tvořeny jedním panelem. Každá z těchto FVE je komplementována spolu s VE na vrcholu stožáru veřejného osvětlení. Vše je připojeno do rozváděče, kde se nachází měniče, měřicí ústrojí, akumulátory a jistící prvky.



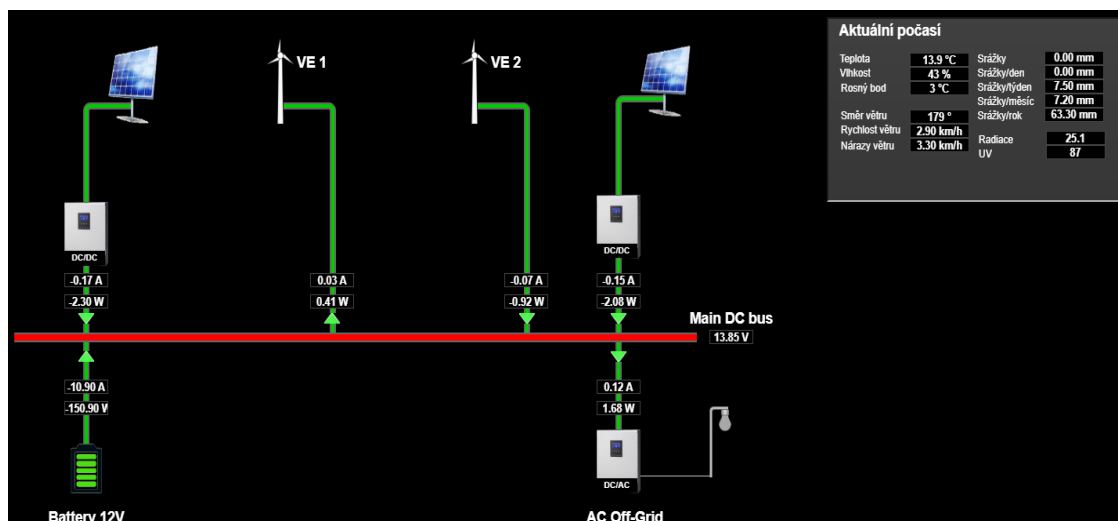
Obrázek 12 ... Realizace souboru FVE P3 a VE P1



Obrázek 13 ... Realizace souboru FVE P4 a VE P2

První z těchto FVE (P3) je vyrobena z monokrystalického křemíku, druhá (P4) z polykrystalického. Z fotografií výše a teorie v kapitole 2.4.1 lze vyvodit jasný závěr aplikace té které technologie v praxi. Monokrystalický panel o instalovaném výkonu 120Wp má menší užitnou plochu než polykrystalický, přesto má však větší výkon.

4.1 Schéma a popis vyšetřované FVE



Obrázek 14 ... Schéma vyšetřovaného off-grid systému

Schéma výše je výřezem z online sledovacího systému, ze kterého lze monitorovat chod elektrárny v reálném čase. Operátor má k dispozici data z meteorologické stanice a může monitorovat okolí. Jak FVE tak VE jsou spojeny na 12V sběrnici, ke které jsou připojeny měniče/(PWM regulátory) pro FVE (nominální napětí FVE jsou vyšší než 12V, v tomto případě je to lehce přes 20V [napětí kolísá v závislosti na osvětlení]), akumulátory, do kterých je ukládána energie a měnič pro pouliční osvětlení (přechod na 230V střídavých). Pouliční osvětlení má instalovaný výkon 25W, spotřeba je malá i na poměry výroby off-grid systému.

4.2 Energetická bilance

Výkon vyšetřované FVE je přímo závislý na ročním období a počasí. V letních měsících lze tedy oproti zimním měsícům očekávat zvýšený výnos energie, zapříčiněný lepším postavením země vůči slunci a většímu množství neoblačných dnů.

V praxi, při pořizování FVE platí, že elektrárna o 1000Wp instalovaného výkonu vyrobí 1000kWh ročně. Jelikož instalovaná kapacita těchto FV panelů dohromady je 220Wp, očekáváme tak výnos 220kWh, ne-li více, pokud bude elektrárna optimálně provozována. [17]

Jestliže známe instalovaný výkon jednotlivých FV panelů a podíváme se na příložený Obrázek 15 ... Graf průměrného denního energetického zisku z vyšetřované FVE části off-grid systému za zimní měsíce, pozorujeme, že FVE o výkonu 120Wp pracuje v hodinách s největší výnosností pouze na polovinu. Nesmíme opomenout, že graf je sestaven z průměrných hodnot čili se jedná pouze o orientační hodnotu pro zkoumané období. Realita je taková, že tento panel za perfektních podmínek měl výrobu až 100W_{tl5m}. Takových dnů není mnoho, a tak nastává situace, kdy panel pracuje 1 den v téměř plném výkonu a dalších 10 dnů nevyrobí více než pár Wh v nejziskovějších hodinách. Obdobné je to i u FVE s výkonem 100Wp.

Tabulka 4 ... Balance provozu elektrárny za 3 zimní měsíce

Časové období	Celodenní průměrná výroba			Jednotka
	P3	P4	Pc	
Den	353,05	219,857	572,907	Wh
Prosinec	8,756	5,452	14,208	kWh
Leden	7,661	4,771	12,432	kWh
Únor	9,885	6,155	16,041	kWh
Σ	26,302	16,379	42,682	kWh

Tabulka výše sumarizuje energetickou bilanci průměrné čisté výroby se zahrnutými ztrátami za 3 měsíce. Suma vyrobené energie – 42,68kWh, není v souladu s nastíněným teoretickým ziskem, tedy že by za ¼ roku měla vyrobila FVE ¼ předpovězené energie. Výsledná hodnota se částce přibližuje, musíme respektovat, že skutečné měření je ovlivněné množstvím dopadajícího světla a oblačností v jednotlivých měsících

Nejedná se tak o provoz za ideálních laboratorních podmínek. Už díky tomuto Obrázek 15, použité technologii na FV panelech a celkovému provedení off-grid systému je jasné, že 220kWh je maximum, co lze v takovémto neoptimalizovaném systému vyprodukovat.

5 Odhad ztrát energie na fotovoltaické elektrárně

Protože se jedná o kombinovaný systém, získaná energie je mixem jak FV energie, tak větrné energie. Musíme tak odfiltrovat tyto dvě složky od sebe.

Základem jsou naměřená data ze všech elektráren. Systém je vybaven MTP na výstupu každé elektrárny, které snímají okamžité hodnoty výkonu v sekundových intervalech. V přesné aproximaci by se počítal hodinový průměr ze všech sekundových hodnot. Protože by takovýto objem hodnot byl pro námi použitou metodiku nevhodný, z naměřených 15 minutových průměrů P_{15m} se vytvoří hodinový průměr a ten exportujeme pro následné výpočty.

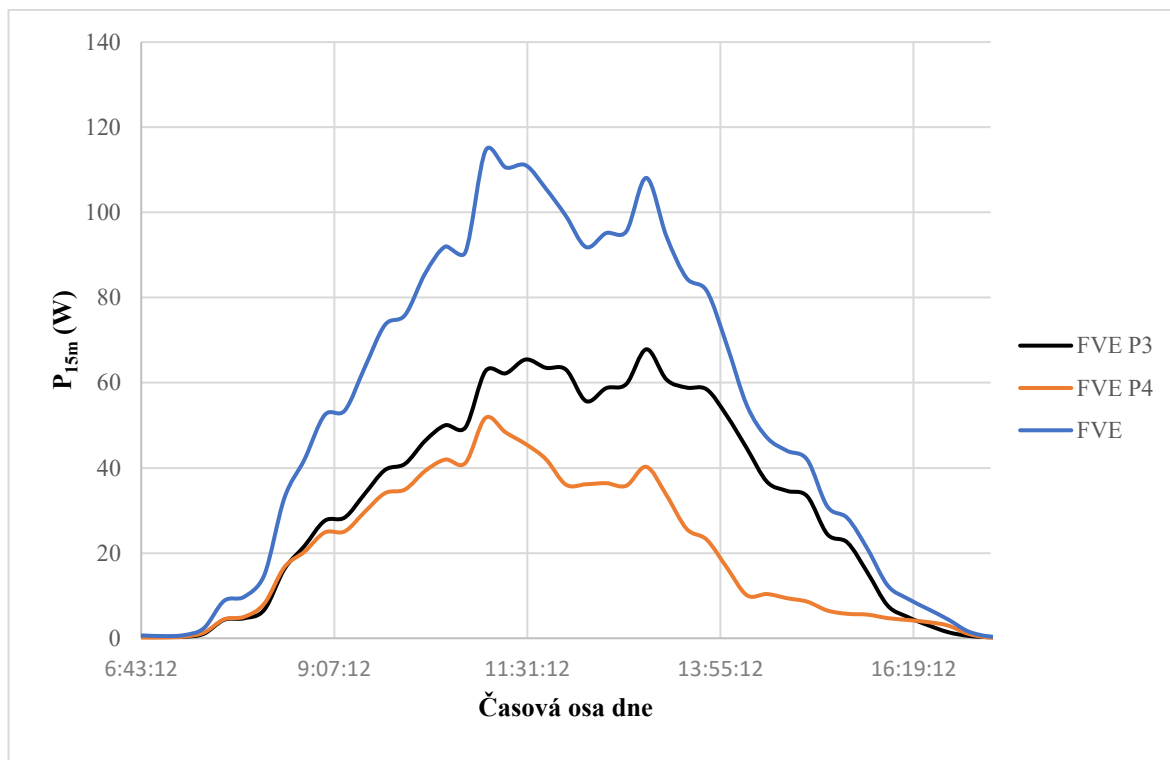
$$P_h = \frac{\sum_{i=1}^n P_{15mi}}{n} [kW; kWh] \quad (6)$$

Už teď je vytvořena první část odchylky. Pokud by měla být odchylka minimalizována, na místě by byl výpočet s 10minutovými, nebo 5minutovými průměry. Zkoumaný systém však kvůli snížení objemu dat poskytuje 15minutové průměry, ty jsou však zaplacený odchylkou. I přes větší čas průměru, s takovýmito intervaly se dá pracovat.

Ačkoliv je postup pro výpočet jednoduchý, nesmíme opomenout vliv VE. Ty vyrábějí spolu s FVE do baterií a veřejného osvětlení energii. Protože je kapacita baterie omezená a spotřeba osvětlení 25W, je nevyhnutelné, že výroba se dříve nebo později zastaví, případně bude tvrdě omezena. Z dat výroby je nutno odfiltrovat tak dny, kdy měla FVE dominantní podíl na výrobě, tedy hodnoty z VE budou naměřená data ovlivňovat minimálně. Vytvoříme 3 kategorie tolerance: 1. kategorie je odchylka 10% od 100% podílu na výrobě energie, ve druhé kategorii je to 20% a třetí kategorie – méně než 80% - nevyhovuje.

Je nutno zavést i další kritérium pro tolerance. Automaticky zahazujeme celý den měření, pokud VE budou v jakýkoliv moment vyrábět více než 5W okamžité hodnoty a bude to ve dnech, kdy výroba z FVE je v 1. a 2. kategorii tolerance. Výjimku tvoří pouze hodnoty, kdy VE přesahuje výrobu 5W a FVE mají jasně dominantní podíl výroby. Jedná se o náhodné poryvy větru nebo chybu měření. Jedná se o bezpečnostní opatření, ikdyž po většinu platilo, že pokud VE vyráběla více než zanedbatelně, FVE se do 1 kategorie ani nedostala. Přesto však došlo v několika případech k takovýmto náhodným událostem.

Ze získaných očištěných hodnot je vyhotoven graf křivek průměrných výrob za sledované zimní měsíce a jejich součet výrob. Průměrná výroba je poloviční, než je instalovaný výkon obou elektráren dohromady



Obrázek 15 ... Graf průměrného denního energetického zisk z vyšetřované FVE části off-grid systému za zimní měsíce

Principem měření ztrát je porovnání křivky průměrné výroby a křivky výroby za sledovaný den. Je třeba určit bod, při kterém elektrárna začala vyrábět a bod, kdy výroba překročí křivku průměrné výroby. Oblast mezi počátečním a koncovým bodem je integrálem ztráty, který spočítáme odečtením obou křivek v této oblasti.

Z celodenních dat se určí období, kdy se energie vyrábí a kdy ne. Hledáme hlavní pásma výroby, pásma, kde je výroba větší než průměrná a nejsou přítomny ztráty a pásma, která nejsou předmětem sledování, nesmíme je však zanedbat.

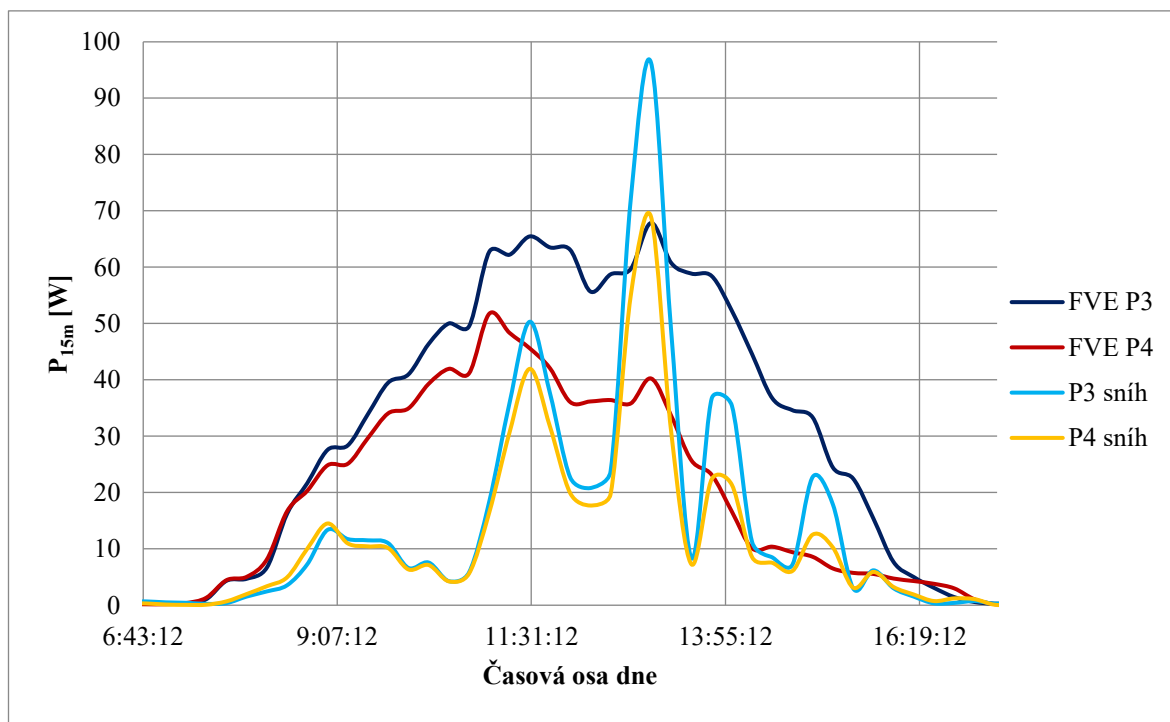
Denní výkon je pak sumou hodinových výkonů. Z denních výkonů je pak možnost spočítat i data za celý měsíc, přenásobením denních hodnot počtem dnů v měsíci.

$$P_{dz} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{hi}}{n} [kWh] \quad (7)$$

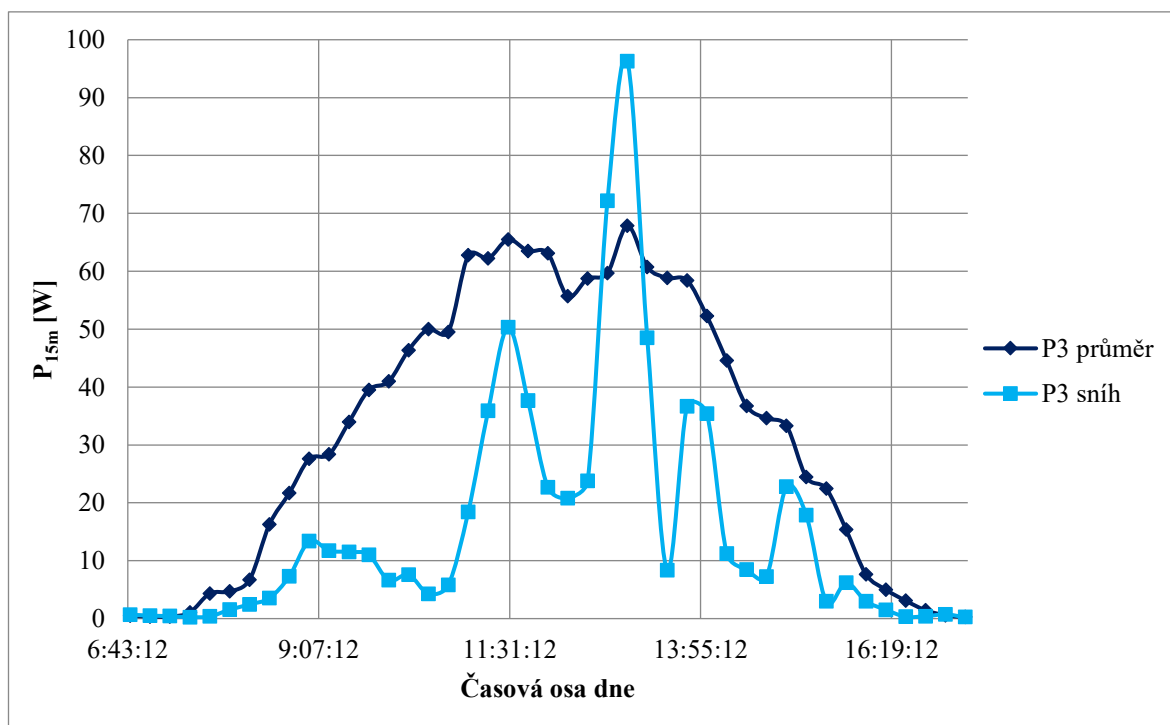
$$P_{mz} = P_{dz} \cdot d [kWh]$$

(8)

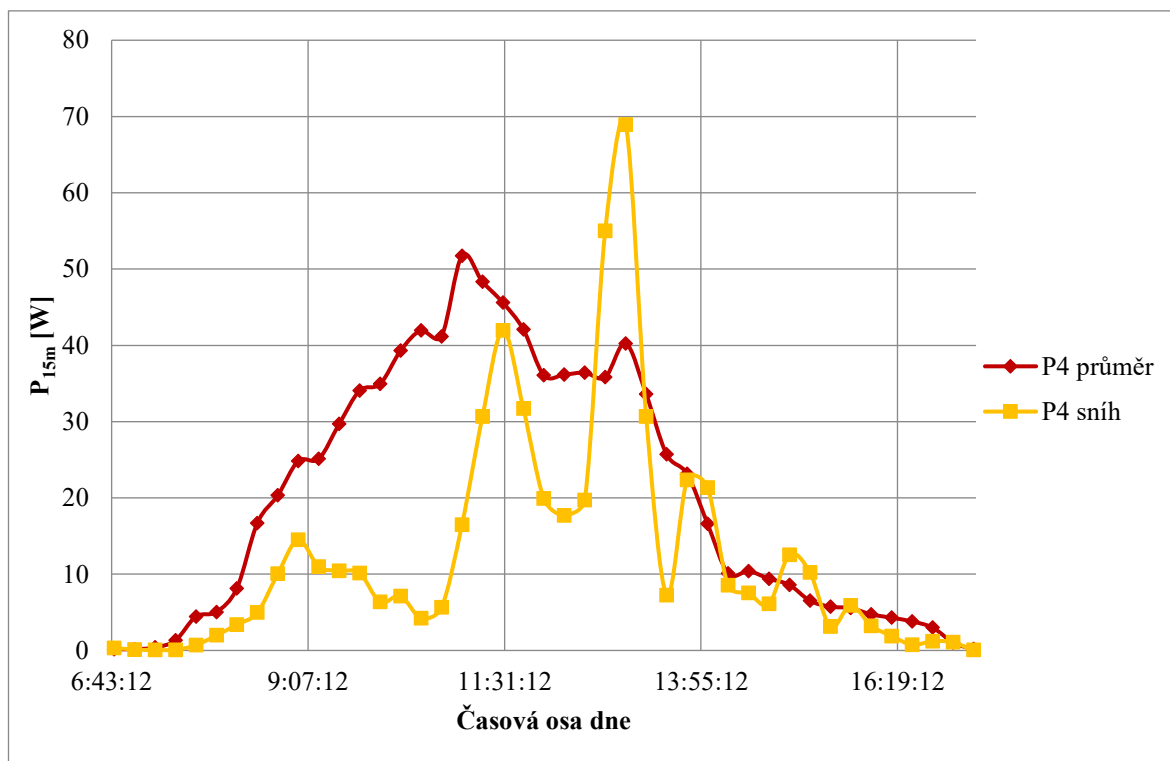
Pro vzorové měření byl vybrán den 28.2.2020, neboť v tento den padal sníh po celý den a podařilo se zaznamenat viditelně další faktor navyšující ztráty systému – plně nabitá baterie. Hodinový průměr se začíná počítat od 7:15 ráno. To je doba, kdy panely začínají vyrábět s východem slunce. Z dostupných hodnot jsou sestaveny grafy, prezentující průměrné výroby na jednotlivých elektrárnách jak ve sledovaný den, tak i za sledované zimní období.



Obrázek 16 ... Graf srovnání hodnot průměrných výrob FVE za zimní měsíce a měřeného dne, kdy padal sníh.



Obrázek 17 ... Podrobné porovnání výroby FVE P3 ve sledovaný den proti průměrné výrobě v zimě



Obrázek 18 ... Podrobné porovnání výroby FVE P4 ve sledovaný den proti průměrné výrobě v zimě

Z výše uvedených grafů se dá vyčíst, že ke ztrátám bude docházet jak před polednem, než roztaje sníh, tak i po poledni, kdy se může objevit nová sněhová pokrývka a začnou působit vlivy nabití baterie. V grafech se to projevuje výkyvy ve výrobě ve formě prudkých špiček nad průměrnou výrobou.

5.1 Ztráty před polednem

Tyto ztráty jsou způsobené pouze sněhem (nepravděpodobné, že by baterie zůstala 100% nabitá v průběhu noci). Klíčový je moment, kdy panely začínají vyrábět energii a moment, kdy roztává sníh. Sníh odtaje a panel začne vyrábět v plné kapacitě, v bodě, kde se křivka výroby panelu protne s křivkou průměrné výroby, je bodem ohraničující konec ztrát sněhem.

Tabulka 5 ... Hodnoty z dopoledního měření

Časové období	Průměr výroby		Ztráta energie		Jednotka
	P3	P4	P3	P4	
7:30-8:30	6,61145	7,130197	4,978623	4,910768	Wh
8:30-9:30	25,56295	23,33085	16,06914	13,14371	Wh
9:30-10:30	42,16239	35,98979	33,9638	28,3292	Wh
10:30-11:30	57,98918	45,76111	35,04073	25,96915	Wh
11:30-12:30	61,29568	39,26393	30,24738	13,06448	Wh
Hodinový průměr	38,72433	30,29518	24,05993	17,08346	Wh
Ochuzená hodinová výroba	14,6644	13,21172			Wh

Tabulka 6 ... Dopolnední ztráty

Časové období	Ztráty v dobách zákrytu			Jednotka
	P3	P4	Pc	
Den	73,322	66,059	139,381	kWh
Prosinec	1,818	1,638	3,457	kWh
Leden	1,591	1,433	3,025	kWh
Únor	2,053	1,850	3,903	kWh
Σ	5,462	4,921	10,384	kWh

Tabulka 7 ... Výroba v době dopoledního útlumu

Časové období	Průměrná výroba v útlumu			Jednotka
	P3	P4	Pc	
Den	193,622	151,476	345,098	Wh
Prosinec	4,802	3,757	8,558	kWh
Leden	4,202	3,287	7,489	kWh
Únor	5,421	4,241	9,663	kWh
Σ	14,425	11,285	25,710	kWh

5.2 Ztráty po poledni

Tyto ztráty jsou způsobeny neoptimálním návrhem off-grid systému. Pokud dojde k plnému nabití baterie, energie vyrobená ať už FVE nebo VE bude zmařena, neboť jsou svorky elektráren odpojeny. Započítáváme do nich taky případné kumulující se sněhové srážky, které mohou napadnout a s klesající teplotou a intenzitou slunečního svitu netají – panel zůstává zanesen.

Vzorce pro výpočet těchto ztrát jsou stejné jako ty pro výpočet ztrát před polednem.

Tabulka 8 ... Hodnoty z odpoledního měření

Časové období	Průměr výroby		Ztráta energie		Jednotka
	P3	P4	P3	P4	
12:30-13:30	61,176	34,356	11,360	-1,963	Wh
13:30-14:30	50,168	17,190	30,135	3,785	Wh
14:30-15:30	30,310	8,128	18,444	0,227	Wh
15:30-16:30	10,719	4,822	7,911	1,842	Wh
16:30-17:30	1,137	1,620	0,678	0,974	Wh
Hodinový průměr	23,084	7,940	14,292	1,707	Wh
Ochuzená hodinová výroba	8,791	6,232			Wh

Období mezi 12:30 a 13:30 vyřazujeme z měření, porovnávaná výroba je nad průměrnou výrobou, tedy ideální stav, a v měření se to projeví zápornou hodnotou.

Tabulka 9 ... Odpolední ztráty

Časové období	Ztráty v dobách zákrytu			Jednotka
	P3	P4	Pc	
Den	35,166	24,932	60,098	Wh
Prosinec	0,872	0,618	1,490	kWh
Leden	0,763	0,541	1,304	kWh
Únor	0,985	0,698	1,683	kWh
Σ	2,620	1,857	4,477	kWh

Tabulka 10 ... Výroba v době odpoledního útlumu

Časové období	Průměrná výroba v útlumu			Jednotka
	P3	P4	Pc	
Den	92,337	31,762	124,098	Wh
Prosinec	2,290	0,788	3,078	kWh
Leden	2,004	0,689	2,693	kWh
Únor	2,585	0,889	3,475	kWh
Σ	6,879	2,366	9,245	kWh

5.3 Korekce ztrát

Kombinované ztráty budou součtem ztrát za celý den, způsobenými buď sněhem, nebo nemožností uložit více vyrobené energie.

Ztráty za celý den jsou poté násobeny počtem dní v měsíci a jednotlivé měsíce sečteny. Získáme tak charakteristiku systému za sledované roční období.

Tabulka 11 ... Suma dopoledních ztrát

Ztráty před polednem			
Ztráty za zimní měsíce	P_{zAM}	10,384	kWh
Výroba v době před polednem	P_{rAM}	25,710	kWh
Ochuzený výroba	P_{roAM}	15,326	kWh

Tabulka 12 ... Suma odpoledních ztrát

Ztráty po poledni			
Ztráty za zimní měsíce	P_{zPM}	4,477	kWh
Výroba v době po poledni	P_{rPM}	9,245	kWh
Ochuzený výroba	P_{roPM}	4,768	kWh

Tabulka 13 ... Suma nekorigovaných ztrát

Kombinované ztráty			
Ztráty za zimní měsíce	P_{zK}	14,861	kWh
Výroba v dobách ztrát	P_{rK}	34,955	kWh
Ochuzený výroba v době ztrát	P_{roK}	20,094	kWh
Celodenní výroba v zimě	P_{dcK}	42,682	kWh
Celodenní ochuzená výroba	P_{doK}	22,588	kWh
Poměr ztrát za 3 měsíce	η_K	47,079	%

Tato čísla je nutno zpřesnit. V kapitole 5.2 je vynecháno měření mezi 12:30 – 13:30. V této oblasti jsou smíšeny ztráty i výroba nad průměrnou křivkou. Zároveň se jedná o nejvýnosnější oblast dne. Jednotlivé hodnoty jsou fragmentovány mezi tento úsek a neposkytují ucelený údaj, musíme zavést korekční faktor, kterým srovnáme energetické ztráty a dostaneme energetickou bilanci na 0. Aktuální ztráta v systému je 7,727kWh – 18,1% výroby za sledované období. Pro validaci musíme tuto hodnotu dostat na nulu, popřípadě na hodnotu blízkou nule, jestliže nepůjde přesně určit rozdíly měření

Postupujeme tak, že úseky, které se nacházejí ve stavu výnosu i ztráty, poměrně rozdělíme dle místa, kde se protnou křivky. Touto poměrnou hodnotou vynásobíme P_{15m} úsek. Ty části, které se nacházejí nad průměrnou křivkou k ní přičteme. Pozor, i tento úsek je nutno rozdělit v poměru, kde se nám křivky protnuly. Obdobnými metodami jako v kapitole 5.1 a 5.2 spočteme ztráty.

Ke ztrátám v oblasti výroby ještě započítáme výrobu v nesledovaném období. Ta je sice zanedbatelná, v dlouhodobém měřítku je její přínos již značný a může ovlivnit chybu měření.

5.4 Celkové ztráty

Korekci ztrát provedeme jak u denních, tak i celkových ztrát. Po započítání nových ztrát získáme hledané hodnoty:

Tabulka 14 ... Přehled denní výroby

Denní ztráty			
Součet denních ztrát	P_{zD}	227,877	Wh
Výroba v dobách ztrát	P_{rD}	525,718	Wh
Ochuzený výroba v době ztrát	P_{roD}	297,841	Wh
Celodenní výroba	P_{dD}	572,907	Wh
Výroba mimo sledovaná pásma	P_{nD}	8,179	Wh
Poměr denní ztráty	η_d	51,988	%
Chyba korekce	η_{kD}	6,809	%

Tabulka 15 ... Hledané korigované ztráty za zimní měsíce

Celkové korigované ztráty			
Ztráty za zimní měsíce	P_{zC}	16,977	kWh
Výroba v dobách ztrát	P_{rC}	39,166	kWh
Ochuzený výroba v době ztrát	P_{roC}	22,189	kWh
Celodenní výroba v zimě	P_{dC}	42,682	kWh
Celodenní ochuzená výroba	P_{doC}	20,492	kWh
Výroba mimo nesledovaná pásma	P_{nC}	0,609	kWh
Poměr ztrát za 3 měsíce	η_c	51,988	%
Chyba korekce	η_{kC}	6,809	%

Korigované denní ztráty, ve kterých jsou započteny jak ztráty sněhem, nemožnosti uložit více energie do baterie a oblačností, jsou v den měření 227,9Wh, při celkové denní výrobě 572,9Wh. Energie vyrobená v ochuzených pásmech je tak pouze 298,7Wh. Výsledný ztrátový poměr je 52%.

Jestliže se podíváme na odhad ztrát způsobenými stejnými faktory, za všechny zimní měsíce, čísla ztrát budou obdobná, tedy ztráta 52% vyrobené energie. Vyrobená energie v tomto rozmezí je 42,68kWh, ztráty jsou 16,98kWh, a výroba v období ztrát činní 39,17kWh.

Lze si taktéž povšimnout, že systém stále není v energetické rovnováze. To je způsobeno nepříliš přesnou metodou aproximování ztrát a opakovaným průměrováním a sčítáním hodnot. Použitím přesných aproximací a počítáním se sekundovými intervaly, by tomuto problému předešlo. Korekcí bylo dosaženo odchylky 6,81%, oproti předchozí odchylce 18,1%. Jestliže by byl analyzován větší systém FVE, řekněme s instalovaným v desítek kWp, nynější odchylka by byla pro takový systém nepřijatelná, neboť by na základě simulací mohlo dojít ke špatné optimalizaci nebo návrhu systému. Taková odchylka by musela být $\pm 1-5\%$. Stávající odchylka odpovídá přesnosti do 10% měření.

Vzhledem k velikosti FVE a jejímu instalovanému příkonu, je 10% odchylka v dostatečné třídě přesnosti. Nynější ztráta systému v denním intervalu je 39Wh, v celozimním intervalu je to 2,9kWh. Pokud by byl off-grid systém závislý na každém vyrobeném wattu energie, je tato hodnota vysoká. Systém však primárně slouží k nabíjení baterie a napájení veřejného osvětlení s malou spotřebou energie, tudíž ztrátu zanedbáme. Zanedbat může být i díky výkupní ceně energie na trhu. Výkupní ceny za FV energii se pohybují v závislosti na různých poskytovatelích energie na trhu v rozmezí 0,3kč/kWh – 1,3kč/kWh. Potenciální prodělaný výtěžek je 3kč za zimní měsíce.

Pokud započteme faktor nepřesnosti měření MTP a sběrných ústrojí, které mají vlastní třídu spotřeby a budeme uvažovat vlastní spotřebu DC měničů, stávající energetická odchylka 6,81% spadne pod avizovaných 5% a výsledné hodnoty budou adekvátní pro vyšší třídu přesnosti.

5.5 Aplikace

Tuto metodu vyhodnocení lze uplatnit pro libovolné sledované období, nemusí se jednat o konkrétní roční období. Simulací, pokud jsou k dispozici dostatečně kvalitní data v dostačující kvantitě, charakterizující sledované období, je možno replikovat i několikaměsíční úseky měření, ne-li rovnou syntetizovat měření za celý rok, za cenu zvětšení odchylky. Pro takovouto simulaci by stačilo 10 dnů měření v měsíci (více, pokud se bude jednat o kombinované systémy).

Výsledkem takovéto aplikace bude model výnosu energie ve stanovené konfiguraci systému, s odchylkou kolem 10% od skutečné hodnoty, za předpokladu, že se budou respektovat správně veškeré ztráty způsobené měření. Ztráty se budou simulovat na základě dlouhodobých sledování a predikcí k modelu čisté výroby a jednotlivé měřené období budou optimálně přenásobovány korekčními koeficienty pro výnos energie, které se budou odvíjet od měsíce, který bude výchozím z měření, pokud bude jen velmi omezené množství vstupních údajů.

Závěr

V teoretické části této práce je v první kapitole stručně podána teorie, na níž staví technologie fotovoltaiky, tedy jak vzniká elektrická energie působením slunečního záření, jak lze maximalizovat takovýto zisk energie. Nastiňuje taktéž první limitace využití

Druhá kapitola představuje základní konstrukci FV článků a konstrukci FV panelů a pokračuje ve vysvětlení, jaké jsou limitace takovéto technologie, ať už z fyzikálně-kvantových, nebo atmosférických jevů. V samotném závěru kapitoly jsou představeny konstrukční typy FV článků a panelů

Třetí kapitola uvede čtenáře do aplikace FV technologie v České republice. Je zde ukázána historie aplikací, její úskalí, politická podpora, geografické a atmosférické podmínky panující na našem území a předpokládaný vývoj do budoucnosti.

Praktická část, začínající čtvrtou kapitolou, začíná představením samotného zkoumaného off-grid systému. Toto schéma je online vyobrazením sledování systému v reálném čase, kdy je snímán výkon, napětí, proud a jeho směr, na všech prvcích. K přehlednosti je zde i vyústění dat meteorostanice, doplňující přehled pro operátora systému, pokud u něho nemůže být pro přímé pozorování

Samotnou náplní práce bylo porovnání vlivu sněhové pokrývky na celkový výkon v zimních měsících. Na základě dostupných dat byl vyhodnocen graf průměrného výkonu za zimní měsíce. Známý celkový instalovaný příkon FVE je 220Wp, srovnáme-li tuto hodnotu s grafem průměrných výkonu, pozorujeme útlum průměrné výroby na polovinu. K této průměrné výrobě jsou přirovnány naměřené dny, kdy je napadnutý sníh, nastává propad o dalších 50%. Výsledkem je tedy 75% útlum výroby FVE, pokud jsou na ní nahromaděny sněhové srážky, které v průběhu dne přibývají, ale také odtávají. Velice důležitým poznatkem je zjištění, že pokud svítí v dostatečné míře slunce nezastíněné oblačností, a panely jsou nakloněné v úhlu okolo 20°-45°, působí samočisticí vlastnosti panelů. Sluneční záření zahřeje sněhovou masu nebo námrazu, její část se přemění na tenkou vrstvu vody, a ta se buď odpaří, nebo přispěje ke sklouznutí sněhu vlastní vahou. Tento princip funguje i při teplotách pod bodem mrazu, voda se pak nevypařuje, ale sublimuje. Nesmí být však příliš velká zima. Z pozorování tak vyplývá, že panely FVE se takto samočistí v rozmezí 10h ránní až 14h odpolední. V těchto časových úsecích, které jsou energeticky nejvýdělečnější, dokáže FVE vyrobit ztrátu v méně výnosných hodinách a nabít připojené baterie, pak nastává opět útlum.

K nepříznivému číslu 75% ztráty dopomáhá i špatná optimalizace skladování el. Energie v bateriích, kdy baterie po nabití nepřijímají více energie, než vydají na napájení pouličního osvětlení a samovybíjení. Cílem této práce není měření efektivity baterií, musím však doporučit přehodnocení stávajícího návrhu. Jedná-li se o experimentální aplikaci, v rámci výzkumu, kdy jsou do projektu vkládány finance za účelem sběru dat a nalezení efektivního provozu, bylo by na místě se zamyslet nad instalací dalších, popřípadě větších baterií, nebo rovnou nad pořízením dalšího měniče, který bude přebytečnou energii dodávat do sítě.

Seznam použité literatury

- [1] CHMEL, Ladislav. STŘEDNÍ ŠKOLA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ A SOCIÁLNÍ PÉČE, BRNO, PURKYŇOVA 97. Fotovoltaika a fototermika: Učebnice Průmyslové ekologie 1. díl [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://adoc.tips/fotovoltaika-a-fototermika.html>
- [2] CNE CZECH NATURE ENERGY, A. S. Úvod do FV systémů: Fotovoltaické systémy pro výrobu elektřiny [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <http://www.cne.cz/seniori/fotovoltaicke-systemy/uvod-do-fv-systemu/>
- [3] ISOFEN ENERGY S.R.O. Fotovoltaika v podmínkách České republiky [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <http://www.isofenenergy.cz/Slunecni-zareni-v-CR.aspx>
- [4] LIMBERK, Ondřej. Solární Energetika v České republice [online]. [cit. 2020-05-06]. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE Fakulta elektrotechnická Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/10-limberk.pdf>
- [5] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. Solární Energetika v České republice: Kvalita ovzduší v České republice [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/18groc/gr18cz/Obsah_CZ.html
- [6] NAVRÁTIL, Jan. VŠB-TUO. Analýza FV elektrárny [online]. 2013 [cit. 2020-05-06]. DSpace VŠB-TUO. Dostupné z: <https://dspace.vsb.cz/handle/10084/98755>
- [7] NAVRÁTIL, Jan. BALL BRNO, V. O. S. VYUŽITELNOST SOLÁRNÍCH ZAŘÍZENÍ V ČESKÉ REPUBLICE: Využití energie slunce [online]. [cit. 2020-05-06]. DSpace VŠB-TUO. Dostupné z: <http://www.ballbrno.cz/solarni-kolektory>
- [8] MASTNÝ. VUTBR. Sluneční energie [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: http://www.ueen.feec.vutbr.cz/~mastny/vyuka/mmze/prednasky/06_pr.pdf
- [9] MUNI. FVE [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1441/jaro2017/FY2RC_TF1/um/OKfotovoltaika_ZS.pdf
- [10] FYZIKÁLNÍ ÚSTAV AKADEMIE VĚD ČESKÉ REPUBLIKY. Přeměna sluneční energie v energii elektrickou [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/popularizace/premena-slunecni-energie-v-energii-elektrickou#funkce>
- [11] ELEKTROVEGA. Co je to fotovoltaika [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: http://www.elektrovega.cz/info.php?action=info_fotov
- [12] ČAMBALA, Petr, Matěj HRUBÝ, Oldřich MUSELÍK, Tomáš ŠPAČEK a Jiří PROCHÁZKA. Oponentní posudek k vybraným tématům z návrhu Národního Klimaticko-Energetického Plánu (NKEP) pro oblast FVE [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: https://www.solarniasociace.cz/aktuality/20190107_oponentni-posudek-k-nkep-pro-fve.pdf
- [13] WAGNER, Vladimír. Potenciál využití fotovoltaických zdrojů v ČR a ve světě (díl 1.) [online]. 2018 [cit. 2020-05-06]. oenergetice.cz. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/potencial-vyuziti-fotovoltaickych-zdroju-cr-ve-svete-dil-1>
- [14] MASTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL a Tomáš PAVELKA. Obnovitelné zdroje elektrické energie: Fotovoltaika. 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.

- [15] VONDROUŠKOVÁ, Barbora. ČEZ A.S. Modernizace energetických systémů prostřednictvím ETS nástrojů – Modernizační fond a bezplatná alokace pro elektřinu [online]. 2018 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: https://eu.eventcloud.com/file_uploads/50f8cb6c8801b595a3012aa8f2b1c661_3_Vondruskova_CE_Z.pdf
- [16] ERÚ. Roční zpráva o provozu ES v ČR 2018 [online]. 2018 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/4580207/Rocni_zprava_provoz_ES_2018.pdf/1420388b-8eb6-4424-9ad9-c06a57b5326c
- [17] DOLEŽAL, Michal. ALPIQ. Kolik elektřiny vyrobí fotovoltaické panely? [online]. 2019 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/kolik-elektriny-vyrobi-fotovoltaicke-panely/>
- [18] Solar Panel Construction [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction>
- [19] Types of photovoltaic cells [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Types_of_photovoltaic_cells
- [20] Solar Facts and Advice: My Advice: Understand the Advantages, Disadvantages of Different Solar Cells and Who the Market Leaders Are [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.solar-facts-and-advice.com/solar-cells.html>
- [21] L. Bosman and S. Darling, "Difficulties and recommendations for more accurately predicting the performance of solar energy systems during the snow season," 2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Birmingham, 2016, pp. 567-571, doi: 10.1109/ICRERA.2016.7884398. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7884398>
- [22] R. Pawluk, Y. Chen and Y. She, "Observations of Ice at the Interface Between Snow Accumulations and Photovoltaic Panel Surfaces," 2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Rabat, Morocco, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/IRSEC.2018.8703019. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8703019>
- [23] A. G. Husu, M. F. Stan, C. Cobianu, N. Fidel and O. Nedelcu, "An inedited solution to increase the energy efficiency of photovoltaic panels for regions with snow," 2015 13th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES), Oradea, 2015, pp. 1-4, doi: 10.1109/EMES.2015.7158450. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7158450>
- [24] GAY, Charlie. Let it Snow: How Solar Panels Can Thrive in Winter Weather [online]. 2017 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/articles/let-it-snow-how-solar-panels-can-thrive-winter-weather>

Seznam zkratek

AC	Střídavý proud
DC	Stejnoseměrný proud
CHKO	Chráněná Krajinná Oblast
EU	Evropská Unie
EVA	Etylen-vinylacetátterpolymer
FV	Fotovoltaický
FVE	Fotovoltaická elektrárna
MTP	Měřicí Transformátor Proudů
PET	Polyethylentereftalát
PERL	Passivated Emitter Rear Locally-diffused
PM	Polétavá částice (index vyjadřuje velikost v nanometrech)
PP	Polypropylen
PVF	Polyvinylfluorid
PVC	Polyvinylchlorid
Si	Křemík
VE	Větrná Elektrárna
VŠB-TUO	Vysoká Škola Baňská – Technická Univerzita Ostrava
W _p	Jednotka špičkového výkonu Wattpeak

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo;
- беру на вѣдомі, že odevzdáním diplomové (bakalářské) práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě archivována v Ústřední knihovně VŠB-TUO. Souhlasím s tím, že bibliografické údaje o diplomové (bakalářské) práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo, diplomovou (bakalářskou) práci, nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

Odevzdáno dne 15. května 2020



Tomáš Hadašček